

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PINZA ROBÓTICA TRIDIGITAL**

**CESAR DAVID RIAÑO FORERO  
MONICA JOHANNA MENDEZ SOTO**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PINZA ROBÓTICA TRIDIGITAL**

**CESAR DAVID RIAÑO FORERO  
MONICA JOHANNA MENDEZ SOTO**

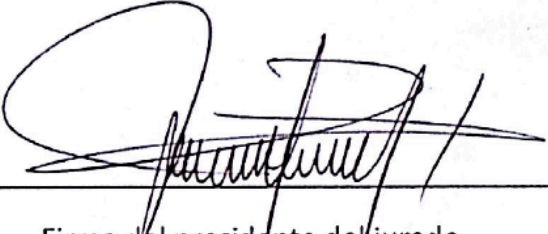
**MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
MECATRÓNICO**

**DIRECTOR: PH.DC MS.C ING. RUBÉN DARÍO HERNÁNDEZ BELEÑO  
CO-DIRECTOR: PH.D MS.C ING. OSCAR FERNANDO AVILES**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
2015**


Nota de aceptación:

El trabajo de grado, titulado  
**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN  
DE UNA MANO ROBÓTICA  
TRIDIGITAL** “elaborado y  
presentado por los  
estudiantes Cesar Riaño y  
Monica Mendez, como  
requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero  
Mecatrónico, fue aprobado  
por el Jurado Calificador



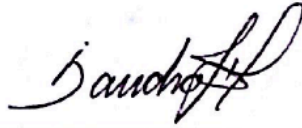
---

Firma del presidente del jurado



---

Firma del jurado



---

Firma del jurado

Bogotá D.C. Mayo de 2015

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, quienes durante mis años de estudio me apoyaron y acompañaron tanto en buenos como en malos momentos, también confiaron en mis capacidades para lograr sacar mi carrera adelante.

Cesar Riaño

A Dios porque sin él nada de esto sería posible. A mis padres Pablo Méndez y Luz Soto, por haberme apoyado en todo lo necesario para lograr culminar esta meta y estar conmigo en todo momento. A Marco Meza y mi hija Valentina Meza, por estar conmigo tanto en los buenos momentos como en los malos, y al ing. Rubén Hernández, por hacer posible la realización de esta monografía.

Johanna Mendez

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Piloto de Colombia, en especial a la facultad de ingeniería mecatrónica, por la oportunidad de mostrar y ampliar mis conocimientos en el campo profesional. A mis padres, que gracias a su sacrificio de costear mi carrera la pude sacar adelante, también por pensar en un futuro mejor para mí, a mi familia que ha sido un apoyo constante en momentos difíciles, a mis amigos y compañeros, por compartir sus conocimientos para lograr un objetivo general en el transcurso del tiempo.

Cesar Riaño

Le agradezco primordialmente a Dios por colmarme de sabiduría y bendiciones para culminar esta etapa de mi vida. A mis padres Pablo Méndez y Luz Soto, por darme la vida y ayudarme a sacar adelante la primera fase de mi vida profesional. A mi hija Valentina Meza, por sacrificar su tiempo a mi lado. A la universidad Piloto de Colombia y la facultad de ingeniería mecatrónica, por la formación académica brindada. Finalmente al ingeniero Rubén Hernández, por apoyarnos con su conocimiento y experiencia en todo lo necesario para sacar adelante esta tesis de grado.

Johanna Méndez

## RESUMEN

La mano humana es considerada una herramienta capaz de ejecutar diversas acciones gracias a sus dos funciones principales de presión y tacto. El sentido del tacto es imprescindible a la hora de sujetar un objeto ya que gracias a esta característica se tiene el juicio de la cantidad de presión que se debe ejercer sobre el mismo.

En esta monografía se presenta el desarrollo del proceso de diseño y construcción de un manipulador tipo gripper que cuenta con un total de seis grados de libertad. Se realiza la descripción matemática de la cinemática que interviene en el gripper y su respectiva validación en el software de matlab®.

Por otra parte se expone diseño mecánico implementado en cada uno de los dedos del gripper y en la palma de la mano para reproducir el movimiento de oposición con respecto a los dedos índice y medio.

Para el diseño electrónico de este manipulador se utiliza el sistema embebido STM32F051 de STMicroelectronics® y dos tipos de sensores: el primero de ellos es el de flexión, empleado con el fin de saber la posición en la que se encuentra cada uno de los dedos del gripper; el segundo de estos se refiere al sensor de fuerza, mediante el cual se determina la presión ejercida en los objetos sujetados por el manipulador. Estos dos sensores actúan en conjunto garantizando un agarre firme y seguro.

El prototipo final del software de simulación en la herramienta GUIDE® de Matlab® presenta al usuario la posibilidad de utilizar la cámara como medio de visualización del objeto que desea hacer sujetar por el gripper. Adicionalmente permite al usuario seleccionar por medio de botones el tipo de movimiento que desea realizar con el manipulador; estos movimientos corresponden a los realizados por la mano humana (flexión, oposición y extensión).

# Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1    Justificación.....	1
1.1.1    Justificación Institucional.....	2
1.1.2    Justificación social.....	2
1.2.1    Descripción del problema.....	2
1.2.2    Formulación del problema.....	3
1.3    Antecedentes bibliográficos.....	3
1.3.1    Historia de los manipuladores.....	3
1.3.2    Manipuladores robóticos .....	5
1.3.3    Aplicación de los robots manipuladores .....	6
1.3.4    Sistema básico de un manipulador.....	6
1.3.5    Configuración morfológica de los robots manipuladores .....	7
1.3.6    Actuador final.....	7
1.3.7    Elementos de sujeción .....	7
1.3.8    Prototipos desarrollados en manipuladores con morfología humana.....	9
1.4    Objetivos.....	20
1.4.1    Objetivo general .....	20
1.4.2    Objetivos específicos.....	20
1.5    Alcances y limitaciones.....	21
1.6    Línea de investigación del programa .....	21
1.7    Organización del documento .....	21
1.8    Diseño metodológico .....	22
Capítulo 2 Conceptos Anatómicos.....	23
2.1    La mano humana .....	23
2.1.1    Biometría de la mano humana.....	23
2.1.2    Movimiento de los dedos .....	24
2.1.3    Analogía robótica.....	27
2.2    Ojo humano.....	30
2.2.1    Anatomía del ojo humano .....	30
2.2.2    Formación de imágenes en el ojo.....	32

2.2.3	Similitudes entre el ojo y la cámara fotográfica .....	33
Capítulo 3 Gripper Robótico.....		34
3.1	Arquitectura general del sistema.....	34
3.2	Sistema mecánico.....	34
3.2.1.	Modelo cinemático del sistema.....	34
3.2.1.1.	Métodos geométricos.....	35
3.2.1.2.	Cinemática directa.....	35
3.2.1.3.	Cinemática inversa .....	36
3.2.2.	Modelo cinemático en matlab®.....	40
3.2.3.	Validación del modelo cinemático .....	41
3.2.4.	Diseño mecánico .....	42
3.2.4.1.	Selección de los mecanismos implementados en los dedos del gripper ....	44
3.2.4.2.	Sistema mecánico para cada uno de los dedos del gripper .....	45
3.2.4.3.	Sistema mecánico para el movimiento de oposición del dedo pulgar.....	46
3.2.4.4.	Análisis de esfuerzos por el elementos finitos del diseño mecánico .....	46
3.2.4.5.	Calculo del torque para los motores.....	51
3.3	Sistema electrónico .....	52
3.3.1	Actuadores .....	54
3.3.1.1	Actuadores eléctricos.....	54
3.3.2	Sensores.....	56
3.4	Programación.....	60
3.5	Control del sistema.....	67
Capítulo 4 Visión Artificial .....		71
4.1	Conceptos generales.....	72
4.1.1	Espectro visible .....	72
4.1.2	Imagen digital .....	73
4.1.3	Espacios de color establecidos en el tratamiento de imágenes.....	73
4.1.3.1	Espacio RGB.....	73
4.1.3.2	Espacio RGB normalizado.....	74
4.1.3.3	Espacio HSI .....	75
4.1.3.4	Espacio HSL.....	76
4.1.3.5	Espacio HSV .....	76



4.2	Etapas de un proceso de visión artificial .....	77
4.3	Aplicaciones de la visión artificial .....	79
4.4	Tipos de imágenes en Matlab® .....	80
4.4.1	Imágenes Binarias.....	80
4.4.2	Imágenes indexadas.....	81
4.4.3	Imágenes en escala de grises.....	82
4.4.4	Imágenes truecolor.....	83
4.5	Filtrado de imágenes.....	84
4.5.1	Procesos de Filtrado.....	84
4.5.1.2	Operación de filtrado en el dominio espacial .....	85
4.6	Ventajas de la visión artificial sobre la visión humana.....	85
Capítulo 5 Integración Pruebas .....		86
5.1	Detector de formas .....	86
5.2	Reproducción de los movimientos realizados por la mano humana.....	89
Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros .....		92
6.1.	Conclusiones.....	92
6.2.	Trabajos futuros.....	92
Anexo 1. Marco Legal.....		93
Anexo 2. Código validación del modelo cinemático del gripper.....		96
Anexo 3. Planos Gripper .....		99
Anexo 4. Hoja técnica Dynamixel .....		100
Anexo 5. Hoja técnica Herkulex.....		102
Anexo 6. Hoja técnica Motor-Reductor.....		105
Anexo 7. Hoja técnica Servo-Motor.....		106
Anexo 8. Hoja técnica Sensor de flexión .....		107
Anexo 9. Sensor de fuerza .....		110
Anexo 10. Diagrama de flujo programa principal.....		113
Anexo 11. Diagrama de flujo programa cerrar mano .....		114
Anexo 12. Diagrama de flujo programa cruzado 1.....		115
Anexo 13. Diagrama de flujo programa cruzado 2.....		122
Anexo 14. Diagrama de flujo programa coger pelota.....		123
Anexo 15. Diagrama de flujo programa coger caja .....		124

Anexo 16. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica en Guide de Matlab® .....	125
Bibliografía.....	126

## Indicé de figuras

<b>Figura 1.</b> Elementos de un manipulador. ....	5
<b>Figura 2.</b> Articulación lineal y rotacional.....	5
<b>Figura 3.</b> Componentes del sistema de un robot manipulador. ....	6
<b>Figura 4.</b> Punto terminal de una pinza.....	7
<b>Figura 5.</b> Robonaut hand.....	9
<b>Figura 6.</b> DLR hand.....	10
<b>Figura 7.</b> Shadow Hand. ....	10
<b>Figura 8.</b> Barrett Hand. ....	11
<b>Figura 9.</b> NAIST-HAND I.....	12
<b>Figura 10.</b> Sistema Mecatrónico Articulado de dos dedos. ....	12
<b>Figura 11.</b> Mano biónica.....	13
<b>Figura 12.</b> Prótesis para manos amputadas.....	13
<b>Figura 13.</b> Mano SDH.....	14
<b>Figura 14.</b> Mano MA-I.....	15
<b>Figura 15.</b> Gripper multifuncional para extracción de granadas. ....	15
<b>Figura 16.</b> RAPHael.....	16
<b>Figura 17.</b> Mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico. ....	16
<b>Figura 18.</b> Diseño de prototipo de prótesis mecatrónica de mano. ....	17
<b>Figura 19.</b> Mano Mioeléctrica Robotha. ....	17
<b>Figura 20.</b> i-limb ultra ....	18
<b>Figura 21.</b> Mano robótica inteligente.....	19
<b>Figura 22.</b> Elu 2 hand ....	19
<b>Figura 23.</b> Mano MUC-I.....	20
<b>Figura 24.</b> Anatomía de la mano humana.....	23
<b>Figura 25.</b> Movimiento de extensión.....	25
<b>Figura 26.</b> Movimiento de aducción.....	25
<b>Figura 27.</b> Movimiento de oposición.....	26
<b>Figura 28.</b> Movimiento de abducción.....	26
<b>Figura 29.</b> Movimiento de flexión.....	27
<b>Figura 30.</b> Movimientos de flexión, extensión, aducción y oposición del dedo pulgar. ....	27
<b>Figura 31.</b> Analogía del gripper con el dedo pulgar.....	28
<b>Figura 32.</b> Esquema anatómico del ojo (zona óptica).....	30
<b>Figura 33.</b> Esquema anatómico del ojo (zona sensorial).....	31
<b>Figura 34.</b> Imagen formada en la retina ....	32
<b>Figura 35.</b> Esquemático del ojo y la cámara fotográfica.....	33
<b>Figura 36.</b> Arquitectura general del sistema. ....	34
<b>Figura 37.</b> Diagrama de cuerpo libre de los dedos índice y pulgar.....	35
<b>Figura 38.</b> Diagrama de cuerpo libre del dedo pulgar. ....	36
<b>Figura 39.</b> Diagrama de cuerpo libre de los dedos índice y pulgar.....	37

<b>Figura 40.</b> Diagrama de cuerpo libre del dedo pulgar.....	38
<b>Figura 41.</b> Diagrama de flujo modelo cinemático en matlab.....	41
<b>Figura 42.</b> Simulación en matlab®.....	42
<b>Figura 43.</b> Componentes mecánicos y dedos. SolidWorks®.....	43
<b>Figura 44.</b> Falanges distal y proximal. SolidWorks®.....	45
<b>Figura 45.</b> Sistema mecánico implementado en el dedo pulgar. SolidWorks®.....	46
<b>Figura 46.</b> Propiedades del material implementado en la construcción del gripper. SolidWorks®.....	47
<b>Figura 47.</b> Factor de seguridad falanges proximal y distal. SolidWorks®.....	48
<b>Figura 48.</b> Falange proximal a escala 1:1. SolidWorks®.....	49
<b>Figura 49.</b> Falange distal a escala 1:1. SolidWorks®.....	50
<b>Figura 50.</b> Análisis por elementos finitos del pasador 1:1. SolidWorks®.....	51
<b>Figura 51.</b> Medidas Falanges.....	51
<b>Figura 52.</b> Circuito etapa de potencia.....	53
<b>Figura 53.</b> Partes de moto-reductor.....	56
<b>Figura 54.</b> Servomotor.....	56
<b>Figura 55.</b> Sensor flexible.....	57
<b>Figura 56.</b> Partes sensor de fuerza resistivo.....	58
<b>Figura 57.</b> Puente wheatstone con amplificador diferencial.....	59
<b>Figura 58.</b> Control de lazo cerrado del sistema.....	67
<b>Figura 59.</b> Entradas del controlador. matlab®.....	67
<b>Figura 60.</b> Entradas del controlador. matlab®.....	68
<b>Figura 61.</b> Respuestas del controlador. matlab®.....	69
<b>Figura 62.</b> Sistema usuario-gripper.....	70
<b>Figura 63.</b> Matriz de números recibidos que describen una imagen tomada por una cámara. .....	71
<b>Figura 64.</b> Longitudes de onda visibles.....	72
<b>Figura 65.</b> Cubo RGB.....	74
<b>Figura 66.</b> Cubo unitario.....	74
<b>Figura 67.</b> Espacio HSI.....	75
<b>Figura 68.</b> Espacio HSL.....	76
<b>Figura 69.</b> Espacio HSV.....	77
<b>Figura 70.</b> Etapas del proceso de visión.....	78
<b>Figura 71.</b> Imagen binaria.....	81
<b>Figura 72.</b> Estructura de una imagen indexada.....	82
<b>Figura 73.</b> Imagen de intensidad.....	83
<b>Figura 74.</b> Imagen RGB o truecolor.....	83
<b>Figura 75.</b> Diagrama reconocimiento de formas.....	86
<b>Figura 76.</b> Captura de objetos.....	87
<b>Figura 77.</b> Objeto dentro del recuadro y centroide del mismo.....	87
<b>Figura 78.</b> Delineamiento de los objetos y contorno.....	88
<b>Figura 79.</b> Objeto reconocido y bordeado.....	88

<i>Figura 80. Agarre de objetos.....</i>	89
<b><i>Figura 81. Movimiento de oposición.....</i></b>	90
<b><i>Figura 82. Movimiento de flexión.....</i></b>	91
<b><i>Figura 83. Movimiento de extensión. ....</i></b>	91
<b><i>Figura 84. Sistema de coordenadas.....</i></b>	94
<b><i>Figura 85 . Sistema de coordenadas 2.....</i></b>	95
<i>Figura 86. Aspecto del Servomotor Dynamixel AX-12.....</i>	100

## Indicé de Tablas

<i>Tabla 1. Morfología de los robots manipuladores. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Longitud promedio de las falanges de un hombre dadas en mm. ....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Tipos de agarre.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 4. Similitudes entre las partes del ojo y las de la cámara. ....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5. Comparación de los sistemas mecánicos más utilizados en la transmisión de movimiento de pinzas robóticas. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6. Mecanismos para transmisión de movimiento entre ejes que se cortan.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7. Datos del análisis. SolidWorks®.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Descripciones de la tarjeta stm32f407 y la launchpad MSP430. ....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 9. Tabla de verdad L293D.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10. Referencias de motorreductores con su respectiva descripción.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 11. Clases de imágenes en matlab®.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 12. Ventajas de la visión artificial sobre la visión humana. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 13. Normas ISO para robots manipuladores. ....</i>	<i>93</i>

# Capítulo 1 Introducción

La mano humana es considerada una herramienta capaz de ejecutar diversas acciones gracias a sus dos funciones principales de presión y tacto. El sentido del tacto es imprescindible a la hora de sujetar un objeto ya que gracias a esta característica se tiene el juicio de la cantidad de presión que se debe ejercer sobre el mismo.

En este proyecto se desarrolla un robot manipulador tipo gripper cuyo diseño mecánico y electrónico tiene como objetivo implementar un sistema capaz de reproducir los movimientos de la mano humana (oposición, flexión y extensión) utilizando los tres dedos principales de la misma (medio, índice y pulgar), con el fin de manipular diferentes objetos.

Para lograr lo escrito anteriormente el prototipo cumple los siguientes requerimientos: diseño morfológico del gripper en base a los tres dedos principales de la mano humana, implementación de un sistema mecánico que simula los movimientos de la mano e integración de sensores de posición y presión en las falanges.

Para el control de posición se utilizan sensores de flexión, los cuales varían su resistencia dependiendo de la flexión a la que estén sometidos. Por medio del sistema embebido *STM32F4 Discovery*, se realiza una conversión ADC del valor de los sensores que toman como referencia los datos generados por el reconocimiento de imágenes. Con los sensores de presión se realiza el mismo procedimiento anterior para así controlar el agarre de diferentes clases de objetos bien sea delicados o robustos.

A futuro se busca que por medio de este tipo de robots, se pueda tener más precisión a la hora de realizar una cirugía, o en la industria en trabajos donde el operario tenga alto riesgo de accidente, finalmente en el campo de las prótesis para poder seguir señales enviadas por el cerebro como lo hace la mano humana.

## 1.1 Justificación

La idea de construir un robot de este tipo surge con la necesidad de garantizar la seguridad de operarios en diferentes procesos industriales, pero también con la finalidad de implementarse en un futuro como prótesis humana. La motivación principal al hacer este proyecto se da ya que un manipulador tipo gripper se puede implementar en diferentes campos de acción, como lo son: la medicina; realizando

algún tipo de cirugía, la industria automotriz; pintando un automóvil, la docencia; enseñando el alfabeto dactilológico, entre otros. [1]

### **1.1.1 Justificación Institucional**

Una mano robótica en la Universidad Piloto de Colombia, abriría el campo de investigación en la línea de biomecatrónica, ya que por medio de este proyecto se estudiarán y analizarán los diferentes movimientos producidos por la mano humana en el momento de agarrar, transportar, soltar y manipular un objeto.

### **1.1.2 Justificación social**

En Colombia existen diversos procesos industriales que ponen en riesgo la seguridad de las personas (operarios), ya que pueden sufrir la pérdida de alguna extremidad. Un ejemplo de esto son las máquinas que se encargan del moldeo por soplado, ya que sueltan la pieza en un compartimento inseguro en donde el operario puede sufrir la pérdida de la mano o de los dedos. En este caso, la implementación de una mano robótica para recoger la pieza y quitarle la rebaba sería una solución viable.

## **1.2 Planteamiento del problema**

### **1.2.1 Descripción del problema**

Durante años ha surgido la intención de crear robots que asemejen movimientos del ser humano. En este caso se estudiarán las diversas manos robóticas creadas para ser incursionadas como prótesis o colaboradoras industriales. [2]

En el mundo existen numerosas manos robóticas de diferentes tamaños, formas e incluso número de dedos, pero la mayoría tiene como finalidad lograr la mayor cantidad de movimientos similares a los realizados por el ser humano.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se desarrolla un prototipo mecánico eléctrico que logre realizar movimientos similares a los producidos por el ser humano, con la intención de sujetar y manipular confiablemente un objeto sin importar su forma o material.

Para obtener resultados en esta investigación surgen las siguientes inquietudes: ¿Cuáles movimientos realizara la mano robótica? ¿Cuántas falanges poseerán cada dedo? ¿Qué mecanismo utilizar para el movimiento de las falanges y cómo posicionarlo dentro de la estructura de los dedos? ¿Cómo diseñar la interfaz gráfica de manera que sea de fácil manejo para el usuario?



### 1.2.2 Formulación del problema

El problema se centra en la creación de un manipulador tipo gripper de tres dedos dotados cada uno con dos falanges, capaz de simular los movimientos producidos por tres dedos (pulgar, índice, medio) de la mano humana y sujetar dos tipos de objetos (cubos y esferas).

### 1.3 Antecedentes bibliográficos

La robótica es la ciencia que estudia el diseño y la creación de máquinas; cuyo objetivo es desempeñar tareas que requieren de inteligencia.

El termino robot proviene de la palabra *robota* que se refiere a “*trabajo realizado de manera forzada*”. Este término se popularizo por el escritor checo Karel Capek en su obra *Rossum's Universal Robot*. [3] Pero actualmente los robots se definen como manipuladores multifuncionales, reprogramables. Los robots se pueden clasificar en distintos aspectos [4] uno de ellos es según su arquitectura:

*Poli articulados*: son los robots que tienen diversa forma y configuración además se caracterizan principalmente por ser estatico y estructurados para mover sus elementos.

*Móviles*: son aquellos robots que tienen capacidad de desplazamiento basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante.

*Androides*: son aquellos robots que reproducen parcialmente el comportamiento cinemático del ser humano pero actualmente no tienen utilidad práctica.

*Zoomórficos*: esta clase de robots se caracterizan por tener un sistema locomotor que imitan diversos seres vivos. Se clasifican en caminadores y no caminadores.

*Híbridos*: estos robots con aquellos cuya clasificación es difícil ya que combinan las arquitecturas expuestas anteriormente. Los robots trabajan utilizando tres etapas: procesar; como su palabra lo indica se encarga de procesar información y de acuerdo a su programación tomar decisiones, percibir; es la forma en la cual el robot toma conocimiento del entorno que lo rodea; actuar: realizar la acción para la cual está programado. [5]

#### 1.3.1 Historia de los manipuladores

George Devol, fue el primero en patentar un manipulador programable en 1948, con el fin de manipular elementos radioactivos sin colocar en riesgo al operador. Este manipulador consistía en un dispositivo maestro-esclavo, en donde el maestro

producía los movimientos y el robot los reproducía. El operador tenía la posibilidad de observar las acciones del robot y sentir las fuerzas que el esclavo ejercía. [6]

En 1954, Goertz sustituyó la transmisión mecánica por eléctrica y desarrollo, el primera tele-manipulador con servo control bilateral. Años después en 1958 Ralph Mosher, ingeniero de General Electric desarrollo dos brazos mecánicos llamados Handy-Mano tele operados mediante un maestro denominado exoesqueleto. Con respecto a estos avances la industria submarina y la industria espacial se interesó en este tipo de manipuladores, sin embargo la evolución de los tele-manipuladores no ha sido tan desbordante como la de los robots. [6]

En 1973 ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, cuya configuración corresponde a las configuraciones esférica y antropomórfica usadas especialmente en la manipulación. En 1982, Makino profesor de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrollo el concepto de robot SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*), el cual busca un robot con 3 o 4 grados de libertad, un coste limitado y una configuración basada en el ensamble de piezas. [7]

El año de 1980 fue nombrado como el "primer año de la era robótica" debido a que la producción de robots aumento notablemente con respecto al año anterior. El principal factor en cuanto al crecimiento de los robots han sido los avances en microelectrónica e informática. En el desarrollo de la robótica industrial se distinguen tres generaciones.

La primera generación hace referencia a los robots programables y manipuladores que sólo podían memorizar movimientos repetitivos, asistidos por sensores internos para lograr moverse con precisión. [7]

La segunda generación comienza desde el final de los años setenta en donde los robots contaban con sensores externos de tacto y visión que generan información limitada del entorno. En esta generación, los robots tienen la capacidad tomar decisiones y reaccionar ante algunos eventos en el entorno de trabajo. Lo que se conoce como robots adaptativos.[7]

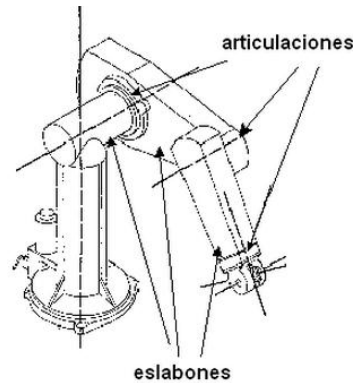
La tercera generación surge en los últimos años empleando inteligencia artificial y haciendo uso de los ordenadores más avanzados; permitiendo al robot realizar razonamientos lógicos y aprender. La inteligencia artificial permite a los robots resolver problemas inteligentemente e interpretar información compleja que procede de sensores. [8]

### 1.3.2 Manipuladores robóticos

Según la definición que ofrece el **ROBOT INSTITUTE OF AMERICA** después denominado **ROBOT INDUSTRIES ASSOCIATION (RIA)**, un robot es un “Manipulador funcional reprogramable, capaz de mover material, piezas, herramientas o dispositivos especializados mediante movimientos variables programados, con el fin de realizar tareas diversas”. [9]

Los manipuladores robóticos se basan en una serie de elementos denominados enlaces o eslabones, unidos por medio de juntas o articulaciones, que permiten el movimiento de dos eslabones sucesivos. Como se evidencia en la **figura 1**. [10]

**Figura 1.** Elementos de un manipulador.

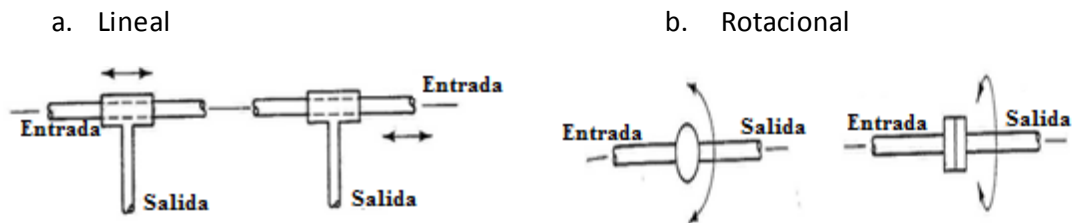


**Fuente:** Estructura e un robot industrial.

URL: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzalez/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/sistema/morfologia.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzalez/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/morfologia.htm)

Las articulaciones se pueden clasificar en lineal y rotacional como se muestra en la **figura 2**, entiéndase como lineal cuando un eslabón se desliza sobre un eje asociado al eslabón anterior, y como rotacional cuando el eslabón gira en torno al eje anterior. [11]

**Figura 2.** Articulación lineal y rotacional



**Fuente:** Robótica y mecatrónica. URL: [http://roboticaymecatronica123.blogspot.com/2012/06/blog-post\\_6452.html](http://roboticaymecatronica123.blogspot.com/2012/06/blog-post_6452.html).

### 1.3.3 Aplicación de los robots manipuladores

Los robots se utilizan en diversos ambientes [12], como se evidencia a continuación:

**Industria:** son utilizados en varios procesos industriales, como: pinturas de spray, soldadura de punto, transportación de materiales, entre otros.

**Laboratorios:** se emplean en trabajos como preparación de muestras, centrifugados, medición de pH, etc.

**Manipuladores cinemáticos:** Su primera aplicación fue en la industria nuclear siendo manejados por tele operadores con el fin de manejar materiales radioactivos.

**Educación:** en este momento se encuentran robots en las aulas de clase enseñando ciencias computacionales, entre otros.

**Espacio:** realizando exploración espacial.

### 1.3.4 Sistema básico de un manipulador

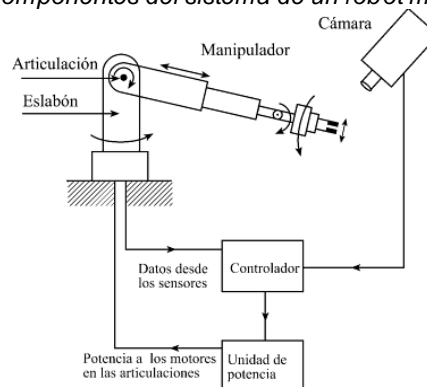
Con el fin de que un robot manipulador opere individualmente opere se necesita los siguientes componentes que además se ilustran en la **figura 3**. [13]

**Brazo:** consiste en un sistema de articulaciones mecánicas, actuadores y sensores de posición que son utilizados en el sistema de control.

**Controlador:** recibe las señales de los sensores de posición y envía los comandos necesarios a la unidad de conversión.

**Unidad conversión de potencia:** provee la alimentación a los motores de las articulaciones.

**Figura 3.** Componentes del sistema de un robot manipulador.



**Fuente:** caracterización de un manipulador. URL: [http://www.info-ab.uclm.es/labeled/Solar/electronica/morfologia/estructura\\_mecanica.htm](http://www.info-ab.uclm.es/labeled/Solar/electronica/morfologia/estructura_mecanica.htm)

### 1.3.5 Configuración morfológica de los robots manipuladores

Los robots manipuladores se pueden clasificar según el tipo de movimiento de sus articulaciones, como se muestra en la **tabla 1**. [14]

### 1.3.6 Actuador final

Se entiende como actuador final a la herramienta que se encuentra en la parte final del robot cuya intención es realizar una tarea específica, como por ejemplo: soldar, pintar, sujetar, etc. *“el punto más significativo del actuador final se denomina punto terminal. En el caso de una pinza, el punto terminal vendría a ser el centro de sujeción de la misma.”* Como se puede ver en la **figura 4**.

**Figura 4.** Punto terminal de una pinza.



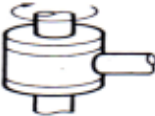
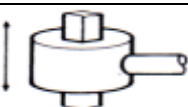
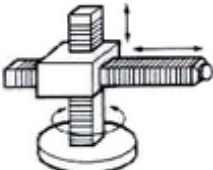
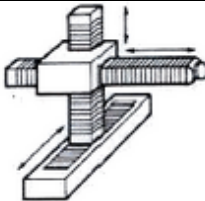

**Fuente:** Robots industriales URL: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0708/archivos/\\_15/Tema\\_5.4.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm)

Los elementos del actuador final se puede dividir en dos categorías: las pinzas; son utilizadas para sujetar un objeto durante el periodo de trabajo de un robot, y las herramientas; utilizadas para tareas específicas sobre una pieza de trabajo. [15]

### 1.3.7 Elementos de sujeción

Como se mencionó anteriormente un actuador final o elemento terminal es una herramienta especial que permite al robot desarrollar una tarea específica. Estos elementos terminales se pueden dividir en dos categorías: pinzas o herramientas. Las pinzas robóticas son utilizadas comúnmente para sujetar diversos objetos durante cierto ciclo de trabajo. Estas pueden estar dotadas de dos o más dedos y también pueden incluir otros métodos de sujeción tales como: ganchos, imanes o cucharas. Finalmente las herramientas se usan como actuador final en aplicaciones en donde se requiera hacer una tarea determinada, como por ejemplo: colocar puntos de soldadura, pintar, taladrar, entre otros. Estas se encuentran ubicadas en la muñeca del robot. [16]

**Tabla 1. Morfología de los robots manipuladores.**

CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
Rotación	 <p><i>Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.</i></p>	Se utiliza en robots industriales debido a que es más sencillo generar los movimientos producidos por los actuadores.
Prismática	 <p><i>Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.</i></p>	Cuenta con un solo grado de libertad y consiste en una traslación a lo largo del eje.
Cilíndrica	 <p><i>Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.</i></p>	Posee dos grados de libertad y se producen movimientos de traslación y rotación.
Planar	 <p><i>Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.</i></p>	Se genera el movimiento de desplazamiento en un plano.
Esférica	 <p><i>Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.</i></p>	Produce movimientos similares a los del brazo humano.

**Fuente:** Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.

### 1.3.8 Prototipos desarrollados en manipuladores con morfología humana

En la actualidad el tema de robots manipuladores se ha tenido en cuenta a nivel mundial en diferentes grupos de investigación; en donde se han desarrollado propuestas interesantes en la búsqueda de generar comportamientos con características similares a las del ser humano, específicamente en el área de manipulación de elementos.

Robonaut hand está compuesta por cinco dedos y posee en general catorce grados de libertad. En si se encuentra conformada por un antebrazo que contiene “*catorce motores, doce placas de circuitos y todo el cableado*”.

La mano posee dos funciones: manipulación (*manipulación o accionamiento de un objeto*) y agarre (*mantener agarrado el objeto*), esto con el fin de hacer uso de herramientas. El accionamiento de los motores es realizado por medio de los tendones a cada articulación (varas flexibles) produciendo un movimiento lineal dentro de la mano. Posee 42 sensores *para la posición de motores y articulaciones, y sensores para la tensión de los tendones*. Y su prototipo se encuentra en la **figura 5** [17]

**Figura 5.** Robonaut hand.



**Fuente:** Lovchik, C. S., & Diftler, M. A. (1999). The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 907-912). IEEE.

La mano DLR (centro alemán para la investigación en el área del transporte y la industria aeroespacial) está compuesta por cuatro dedos iguales, de los cuales cada uno posee tres grados de libertad, además de esto la palma posee un grado más de

libertad, el cual permite ubicar un dedo frente a los otros tres como se muestra en la **figura 6**.

Cada dedo cuenta con un controlador de comunicación en su base, encargado de la recopilación y distribución de información, esta información es enviada al controlador de comunicación en la base. Por otra parte, con el fin de controlar los dedos y la mano se utiliza un ordenador externo. [18]

**Figura 6.** DLR hand.



**Fuente:** Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H., & Hirzinger, G. (2001). DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 109-114). IEEE.

Shadow hand, es una mano robótica propuesta por *shadow robot company* en el Reino Unido y se puede ver en la **figura 7**. Esta mano cuenta con 20 grados de libertad, sensores de posición, fuerza y táctiles. Además es operada mediante actuadores neumáticos, produciendo así movimientos similares a los producidos por la mano humana. Algunos de los materiales usados para la construcción de este prototipo son: metales, plásticos, policarbonato, entre otros. [19]

**Figura 7.** Shadow Hand.



**Fuente:** Tuffield, P., & Elias, H. (2003). The shadow robot mimics human actions. *Industrial Robot: An International Journal*, 30(1), 56-60.



Robotnik creador de Barrett Hand, una pinza capaz de sujetar diferentes objetos sin importar la forma o la orientación de los mismos gracias a sus tres dedos con dos falanges articuladas y a la capacidad de rotación ( $180^\circ$ ) de dos de sus dedos. El funcionamiento de la pinza depende de la aplicación BHControl, que puede ser usada en Linux y Windows. Esta pinza se evidencia en la **figura 8**.

La comunicación serial de la pinza es realizada mediante CANbus. Algunas aplicaciones son: manipulación de alimentos, montaje de componentes, entre otros. [20]

**Figura 8.** Barrett Hand.



**Fuente:** Miller, A. T., Knoop, S., Christensen, H. I., & Allen, P. K. (2003, September). Automatic grasp planning using shape primitives. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1824-1829). IEEE.

El proyecto NAIST-HAND I se inicia en el 2002 en Nara Institute of Science and Technology y se ilustra en la **figura 9**. Esta mano se compone por cuatro dedos, los cuales funcionan mediante un sistema de engranajes y poleas que permiten el movimiento, los actuadores que hacen posible realizar esto se encuentran ubicados en la palma de la mano.

Cada dedo se compone de un gel transparente, un sensor de fuerza y una cámara. El control de agarre se logra mediante medición de área de contacto lograda por la cámara. [21]

El diseño y construcción de un sistema mecatrónico articulado de dos dedos, actuado con músculos neumáticos fue presentado como tesis de maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica, por el ingeniero electrónico Víctor H. Méndez Salas y su diseño se muestra en la **figura 10**. El proyecto consta de dos dedos que

produzcan movimientos de flexión, abducción, aducción y extensión de la mano, con el funcionamiento de músculos neumáticos.

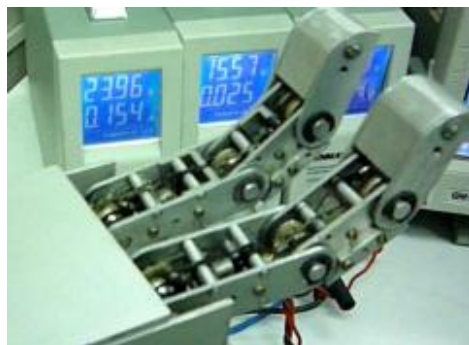
**Figura 9.** NAIST-HAND I



**Fuente:** Ueda, J., Ishida, Y., Kondo, M., & Ogasawara, T. (2005, April). Development of the NAIST-Hand with vision-based tactile fingertip sensor. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 2332-2337). IEEE.

Para obtener el movimiento de las falanges se usa un sistema de poleas con rodamientos de bola ubicadas en cada una de las articulaciones, la programación se realizó mediante labview, en esta se incluía la calibración y ajuste de sensores; monitoreo y activación de las articulaciones, de un dedo y de los dos dedos; entre otros. [22]

**Figura 10.** Sistema Mecatrónico Articulado de dos dedos.



**Fuente:** LAJUD, H. C. & PÉREZ, J. G. H. (2006) "Diseño de un sistema articulado emulando el movimiento de una mano". Cuernavaca Morelos, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Un grupo de investigadores italianos desarrollaron la mano biónica que se muestra en la **figura 11**, que permite a las personas amputadas sentir debido a que se

encuentra conectada directamente al sistema nervioso por medio de electrodos. La mano biónica “posee cinco dedos de aluminio, partes mecánicas de acero y una superficie” según lo publicado por CUBADEBATE. [23]

**Figura 11.** Mano biónica.



**Fuente:** Puglisi, L., & Moreno, H. (2006). *Prótesis Robóticas. Revista del Departamento de Automática e Informática Industrial*, 1-2.

En la universidad Autónoma de México, creo la prótesis mostrada en la **figura 12** permite agarrar objetos de un peso máximo de 20 Kilos. El dedo pulgar posee la habilidad de oposición y flexión, para poder tomar cualquier objeto. Rosa Itzel Flores, explico los movimientos posibles que puede realizar la mano, los que son: gancho, punta fina, bola y puño. [24]

**Figura 12.** Prótesis para manos amputadas.



**Fuente:** Sarmiento, L. C., & Tovar, A. (2007). *Prótesis de mano para personas amputadas de mano y muñeca. Facultad de Ingeniería. Programa de Maestría en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.*

En el 2006, Schunk sorprendió con un gripper de tres dedos con sensores táctiles que permiten la detección de presión y superficies. Esta pinza es apta para sujetar objetos de diferentes formas, tamaños y materiales. Esta pinza se adapta al LWA, que es un brazo robótico. Con el fin de ayudar a personas con discapacidades físicas. Y su diseño se muestra en la **figura 13** [25]

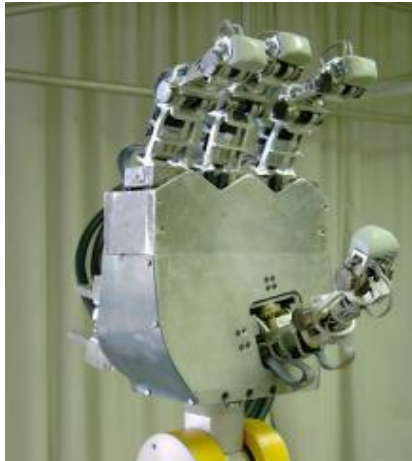
**Figura 13.** Mano SDH.



**Fuente:** Jørgensen, J. A., & Petersen, H. G. (2008, September). Usage of simulations to plan stable grasping of unknown objects with a 3-fingered schunk hand. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nice, France*.

MA-I es una mano que cuenta con cuatro dedos, y dieciséis grados de libertad dados por los dieciséis lazos de cada articulación, como se muestra en la **figura 14**. Esta mano posee dos tipos de articulaciones: la primera es angular sencilla y la segunda es angular acoplada en su centro. La interfase que controla los movimientos de la mano tiene ventanas con diferentes opciones según lo escrito en el paper. Este prototipo fue construido en el instituto de organización y control de sistemas industriales de la UPC por Raúl Suarez y Patrick Grosch. [26]

**Figura 14.** Mano MA-I



**Fuente:** Rosales, C., Porta, J. M., Suarez, R., & Ros, L. (2008, May). Finding all valid hand configurations for a given precision grasp. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1634-1640). IEEE.

El gripper multifuncional para la extracción de granadas, fue diseñado en la universidad Militar. Con el fin de ejecutar cortes, separar tejidos y realizar la extracción de granadas. Este prototipo se compone de un escalpelo con cremallera, un sistema de separación de tejidos y pinzas de prensión. Y su prototipo se evidencia en la **figura 15** [27]

**Figura 15.** Gripper multifuncional para extracción de granadas.

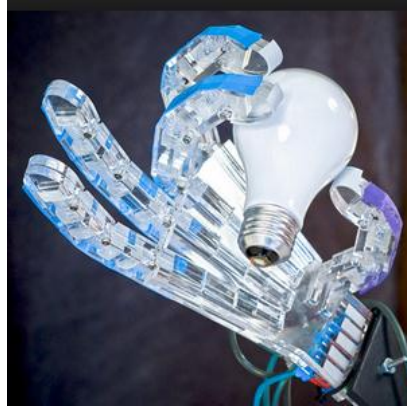


**Fuente:** Guerrero Pérez, D. M., & Durán Gutiérrez, A. (2010). Gripper multifuncional para extracción de granadas.

En la universidad de Kioto investigadores del laboratorio Ishikawa Komuro, desarrollaron una mano con una capacidad impresionante de reaccionar y habilidad de manipulación como se muestra en la **figura 16**. Para esto utilizaron diferentes

*“sensores táctiles y un sistema de reconocimiento visual, además un procesamiento paralelo para mayor velocidad de respuesta”. [28]*

**Figura 16.** RAPHael



**Fuente:** Ontowirjo, B., Paris, R., & Mano, A. (2010, May). Sediment transport modelling during 2004 tsunami runup at Lhok Nga (Sumatra, Indonesia). In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 12, p. 1939).

La mano robótica diseñada por Daniel A Zúñiga y Diego M Andrade se muestra en la **figura 17**, fue creada con el fin de enseñar el lenguaje dactilológico a personas con carencias auditivas. Para dar solución a esto, la mano trabaja con un programa diseñado en el software de labview, en el cual la persona elige la letra que desea aprender y la mano reproduce este movimiento para que luego la persona realice la seña, esta seña es rectificadada con respecto a las imágenes guardadas en el programa. [29]

**Figura 17.** Mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico.

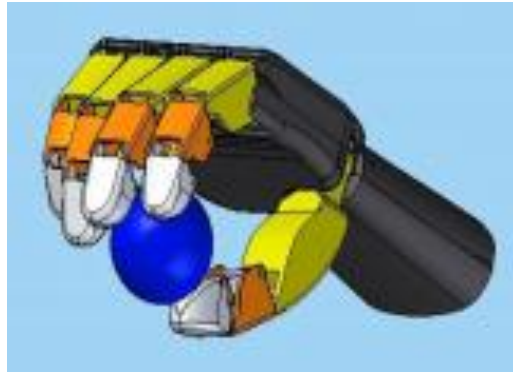


**Fuente:** Andrade Zeas, D. M., & Zúñiga Tenesaca, D. A. (2011). Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas.

El diseño de este prototipo fue creado por Ana Juárez y Rosa Flores, teniendo como objetivo principal el diseño de una prótesis. La cual debía cumplir con dos ítems: primero, colocar el dedo pulgar frente a los otros dedos y segundo, el movimiento independiente de cada uno de sus dedos.

Con el fin de satisfacer las necesidades mencionadas anteriormente utilizaron el mecanismo de Toronto, el cual tiene la ventaja de utilizar solo un motor para el movimiento de los dedos, por medio de eslabones. El prototipo se evidencia en la **figura 18** [30]

**Figura 18.** Diseño de prototipo de prótesis mecatrónica de mano.



**Fuente:** González, J. D., Luna, R. F., Mendoza, A. J., & Zazueta, A. L. DISEÑO DE PROTOTIPO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA DE MANO.

La mano Mioeléctrica es una prótesis creada por Robotha y se encuentra ilustrada en la **figura19**. Esta prótesis es controlada muscularmente, por medio de sensores encargados de tomar señales musculares y enviarlas a un sistema electrónico, para así producir la apertura y cierre de la prótesis. [31]

**Figura 19.** Mano Mioeléctrica Robotha.



**Fuente:** Ordoñez, E. F., & Collahuazo, J. P. (2012, January). Diseño y Construcción de una Mano Robot Activada por Señales Electromiográficas. In Academic & Student Activities ANDESCON 2012.



La i-limb ultra se puede observar en la **figura 20** es una creación de touch bionics, la cual logra movimientos naturales, ya que cada dedo tiene la posibilidad de doblar cada una de sus falanges para adaptarse a la forma de diferentes objetos. Además de esto cuenta con una aplicación para iPhone en la cual los usuarios pueden personalizar los tipos de agarre. [32]

**Figura 20.** i-limb ultra



**Fuente:** Bionics, T. (2012). "I-Limb Ultra.

La universidad de Pierre et Marie Curie, presentó una mano inteligente dotada de reflectores de diferentes clases con el fin de recopilar información en el momento de sujetar algún tipo de objeto y su prototipo se muestra en la **figura 21**. Esta mano robótica posee una cámara que identifica la profundidad a la cual se encuentra el objeto y determina si hay algún tipo de obstáculo, esta cámara también es utilizada para saber qué forma tiene el objeto a sujetar y como hacer el agarre apropiado. Después de tener el objeto agarrado esta lo puede rotar, para utilizarlo a su conveniencia. [33]



**Figura 21.** Mano robótica inteligente.



**Fuente:** Euronews (2013) *El futuro al alcance de la mano* [Vídeo]. Disponible en:  
<http://www.youtube.com/watch?v=Sd1Q0Biz5Ww>

La Elu2 hand como se muestra en la **figura 22** adopta el tamaño de la mano de un adulto humano y cuenta con nueve grados de libertad independientes, lo que le permite la oposición del dedo pulgar a los otros cuatro dedos. Su peso es de 900 gramos, debido a que el material del cual está construida es de metal híbrido/plástico. Es una prótesis comercial que puede ser manipulada por tele-presencia o repitiendo secuencias. [34]

**Figura 22.** Elu 2 hand



**Fuente:** Jiménez, V. P., Sánchez, O. F. A., & Mauledoux, M. (2014). *Diseño de un efector final de tres dedos para agarre óptimo*. DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 81(184), 93-101.

El diseño de un sistema mecatrónico antropomórfico de cinco dedos llamado MUC-I, fue realizado en la universidad militar nueva granada de Bogotá, Colombia. Por los ingenieros Oscar Avilés, Mauricio Rosário, Álvaro Joffre y Paola Niño y su prototipo

se muestra en la **figura 23**. La mano MUC-I cuenta con cinco dedos, de donde el pulgar tiene dos grados de libertad, y los cuatro dedos sobrantes cuentan con un grado de libertad. La mano logra realizar movimiento de flexión y extensión de la mano humana. [35]

**Figura 23.** Mano MUC-I



**Fuente:** Rosario, J. M., Aviles, O. F., Kuteken, R., & Melo, L. F. (2014, June). Virtual Based Antropomorphic Gripper application for Automation Grasping Tasks. In *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on* (pp. 521-526). IEEE.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar y construir un prototipo de mano robótica el cual cuente con los tres dedos principales de la mano humana: pulgar, índice y medio, con el fin de reproducir ciertos movimientos primordiales de la mano: flexión, extensión y oposición.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Diseñar un programa que permita a los usuarios reproducir movimientos en la mano robótica con el propósito de sujetar dos tipos de objetos de forma regular como lo son cubos y esferas.
- ✓ Crear un prototipo mecánico y eléctrico, con la finalidad de cumplir los movimientos estipulados en el objetivo general.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

Esta mano constara de tres dedos; de los cuales uno es opuesto a los otros dos que se encuentran fijos en la palma, cada dedo poseerá dos grados de libertad. La mano deberá poder agarrar y manipular diferentes tipos de objetos.

La limitación de este proyecto radica en crear un sistema completo de movimiento, sensibilidad y fuerza comparable al de la mano humana. Otra limitación que hay que tener en cuenta es la complejidad de hallar materiales que cumplan con todas las características internas requeridas para la elaboración del prototipo manipulador.

## **1.6 Línea de investigación del programa**

El proyecto manipulador tipo gripper es un artefacto mecánico y electrónico que corresponde a la primera generación de la robótica y tiene como propósito realizar determinados procesos de fabricación y/o manipulación de objetos. Por esta razón brinda un aporte a la línea de investigación del programa de robótica y biométrica, ya que se estudian los diversos movimientos de la mano humana y la forma de sujetar objetos.

## **1.7 Organización del documento**

Este documento en primer lugar presenta la historia de los manipuladores, los elementos de sujeción, la configuración morfológica de los manipuladores y su sistema básico de funcionamiento.

En segundo lugar se muestra el diseño metodológico del proyecto manipulador gripper, en el cual se muestran los ítems que se delimitaron a la hora de desarrollar este proyecto.

En tercer lugar se muestran los conceptos anatómicos y biometría de la mano humana, además de la analogía robótica con el gripper. También se enseña la anatomía y funcionamiento del ojo humano, asimismo contiene sus similitudes con respecto a las cámaras fotográficas. En base a lo descrito se realizaron las ventajas de la visión artificial sobre la visión humana.

En cuarto lugar se puede evidenciar la arquitectura general del sistema, el modelo cinemático del sistema y su respectiva validación, el diseño mecánico implementado en cada uno de los dedos del gripper y su análisis por elementos finitos, los tipos de actuadores y sensores que se van a utilizar a la hora de realizar la construcción del manipulador, el diseño electrónico implementado con los respectivos pseudocódigos realizados en el sistema embebido, el control general del sistema y por último el sistema usuario-gripper utilizado para el procesamiento de imágenes.

En quinto lugar se muestra un capítulo de visión artificial el cual se incluyen conceptos generales, las etapas tenidas en cuenta en un proceso de visión artificial, los tipos de imágenes y filtrado utilizados en visión robótica.

En sexto lugar se presentan los resultados obtenidos al hacer la interfaz gráfica en la herramienta Guide® del software de matlab®, los tipos de movimientos realizados por el gripper y la forma de sujetar objetos.

En séptimo se muestran las pruebas realizadas en el prototipo, las formas de sujetar objetos, los movimientos realizados por la mano humana, el reconocimiento de formas a través de la interfaz desarrollada para este proyecto y la transferencia de datos.

Finalmente se citan algunas de las leyes que intervienen a la hora de realizar la construcción de los manipuladores robóticos y los anexos mencionados a través de la monografía.

## 1.8 Diseño metodológico

Con el fin de realizar el proyecto se analizaron los pasos a seguir y posibles dificultades a la hora de desarrollarlo. Por tanto se realizó el esquema evidenciado en la **figura 23**.

**Figura 23.** Esquema metodológico del manipulador.



**Fuente:** Elaboración propia.

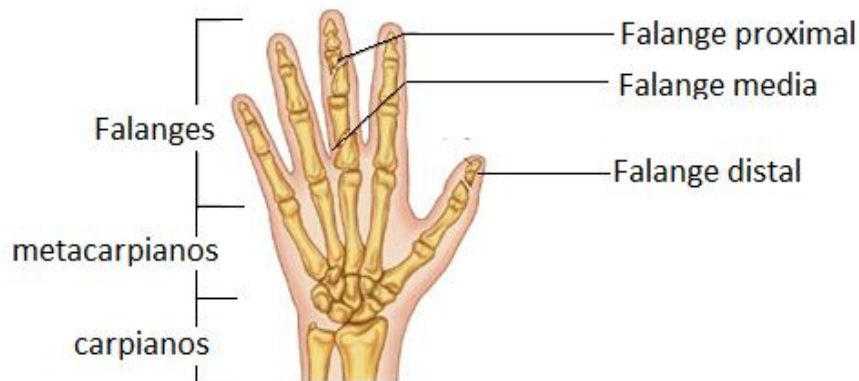
## Capítulo 2 Conceptos Anatómicos

En este capítulo se presentan los conceptos anatómicos que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de la pinza robótica: en primer lugar, se habla sobre la mano humana, su biometría, los tipos de movimiento realizados y la analogía respecto a la mano humana con la pinza robótica; en segundo lugar, se presenta la anatomía del ojo humano, la formación de imágenes en el mismo y las similitudes entre el ojo humano y las cámaras fotográficas.

### 2.1 La mano humana

La mano humana cuenta con 27 huesos los cuales se dividen en tres grupos principales: huesos del carpo (*huesos de la muñeca*), huesos del metacarpo (*huesos de la palma*) y *falanges*. La ilustración de lo dicho anteriormente se muestra en la **figura 24**. [36]

**Figura 24.** Anatomía de la mano humana.



**Fuente:** Anatomía de la mano humana URL: [www.uchospitals.edu](http://www.uchospitals.edu)

#### 2.1.1 Biometría de la mano humana

La palabra biometría proviene de: bio (vida) y metria (medida). [37] En este caso se refiere al promedio de medidas de cada una de las falanges de los hombres con respecto a la edad, como se evidencia en la **tabla 2**. [38] para la construcción del prototipo se tuvo en cuenta la medida de la mano de un hombre de 55 años.

**Tabla 2.** Longitud promedio de las falanges de un hombre dadas en mm.

	Falange	Proximal	Falange	Media	Falange	Distal
Edades	Mano der.	Mano izq.	Mano der.	Mano izq.	Mano der.	Mano izq.
18-19	51±12	51±11	31±6	32±5	24±3	24±4
20-24	50±12	50±12	31±6	31±6	24±3	24±3
25-29	50±13	51±13	31±7	31±7	25±3	25±4
30-34	49±12	50±11	32±7	32±6	25±4	24±4
35-39	43±13	44±12	30±6	29±7	24±3	25±2
40-44	50±16	50±14	30±9	31±9	24±6	24±6
45-49	53±12	50±11	32±7	32±7	24±3	25±3
50-54	51±11	51±11	31±6	31±6	24±3	24±3
55-59	47±16	48±15	30±9	30±8	25±3	25±3
60-64	45±16	45±17	31±9	31±9	25±3	25±3

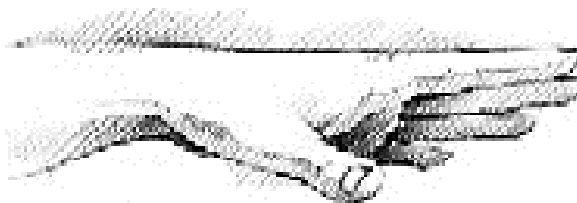
**Fuente:** International Journal of Morphology URL: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022012000200040&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-95022012000200040&script=sci_arttext)

### 2.1.2 Movimiento de los dedos

La mano humana cuenta con cinco dedos de los cuales el índice, el medio, el anular y el meñique; producen los mismos movimientos, mientras que el dedo pulgar tiene la capacidad de oponerse a los otros dedos. Los movimientos de la mano se clasifican en:

**Extensión:** se trata de estirar todos los dedos hasta el punto máximo como lo muestra la **figura 25**.

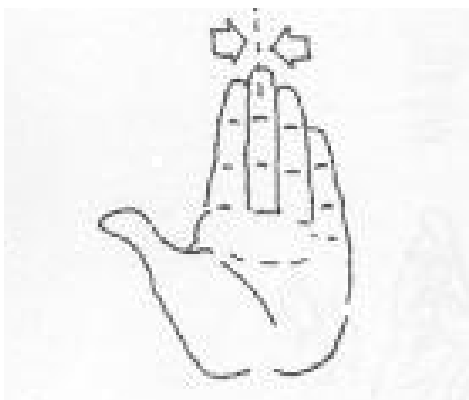
**Figura 25.** Movimiento de extensión.



**Fuente:** Antropometría Dinámica - Movimiento De La Extremidades URL: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=65>

**Aducción:** es la manera en que todos se juntan, como se evidencia en la **figura 26**.

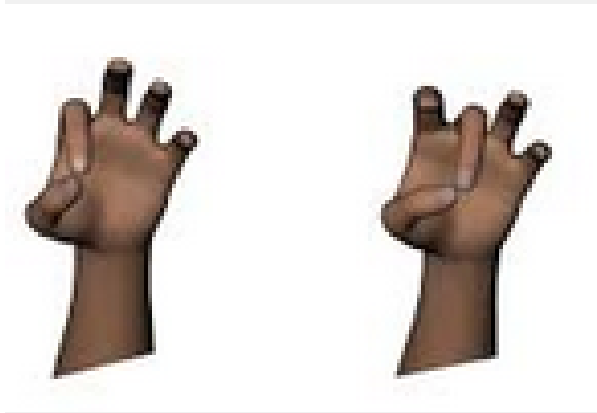
**Figura 26.** Movimiento de aducción.



**Fuente:** Antropometría Dinámica - Movimiento De La Extremidades URL: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=65>

**Oposición:** el dedo pulgar de toca de manera directa con cada uno de los otros dedos. Este proceso se muestra en la **figura 27**.

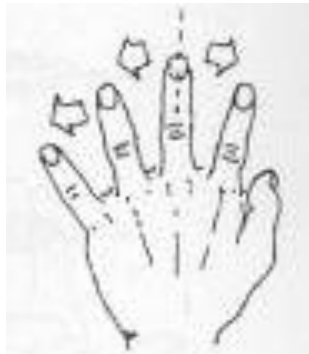
**Figura 27.** Movimiento de oposición.



**Fuente:** movimientos de la mano y muñeca. URL: [traumatologiahellin.wordpress.com](http://traumatologiahellin.wordpress.com)

**Abducción:** se trata de separar todos los dedos hasta formar una especie de abanico. Este movimiento se ilustra en la **figura 28**.

**Figura 28.** Movimiento de abducción.



**Fuente:** movimientos de la mano y muñeca. URL: [traumatologiahellin.wordpress.com](http://traumatologiahellin.wordpress.com)

**Flexión:** Se trata de contraer todos los dedos hacia la palma de la mano, como se ilustra en la **figura 29**.



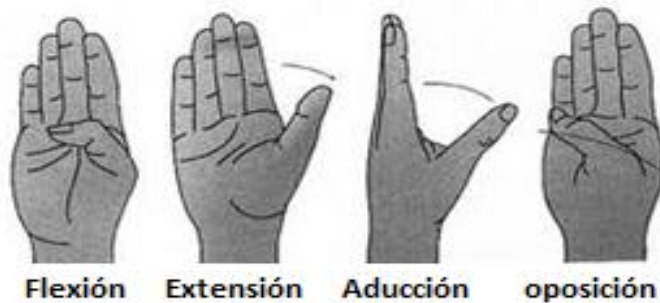
**Figura 29.** Movimiento de flexión.



**Fuente:** movimientos de la mano y muñeca. URL: [traumatologiahellin.wordpress.com](http://traumatologiahellin.wordpress.com)

Así como todos los dedos conjuntamente realizan cada uno de estos movimientos el pulgar es capaz de realizarlo solo. Como se muestra en la **figura 30**.

**Figura 30.** Movimientos de flexión, extensión, aducción y oposición del dedo pulgar.



**Fuente:** movimientos de la mano y muñeca. URL: [traumatologiahellin.wordpress.com](http://traumatologiahellin.wordpress.com)

El diseño de la mano robótica toma en cuenta la falange media y proximal para los dedos: índice, medio, anular y meñique, mientras que para el dedo pulgar toma la falange distal y proximal. [39]

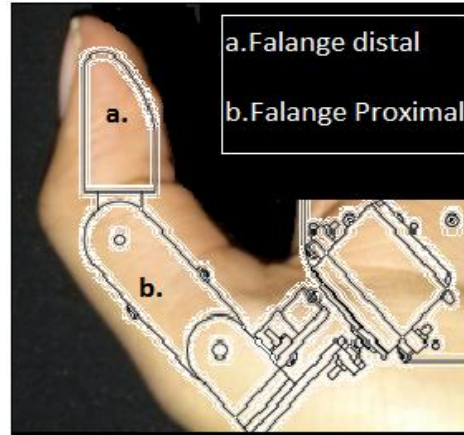
### **2.1.3 Analogía robótica**

Como se planteó en los objetivos del proyecto este manipulador tiene que lograr algunos movimientos de la mano humana, como lo son: flexión, extensión y oposición. Además de esto debe conseguir sujetar objetos cúbicos y esferas, sin producir deformación alguna en el material, no obstante debe poseer un agarre seguro. La sujeción de objetos se logra mediante la adquisición de imágenes y una interfaz de comunicación.

Por tanto el diseño de este prototipo se basa en la mano humana, especialmente en el dedo pulgar; ya que cada uno de los dedos del manipulador tipo gripper cuenta

con las dos falanges de este (falange distal y falange proximal), tal y como se muestra en la **figura 31**.

**Figura 31.** Analogía del gripper con el dedo pulgar.



**Fuente:** Elaboración propia.







Cada uno de los dedos cuenta con dos grados de libertad a excepción del dedo pulgar del manipulador que cuenta con un grado de libertad adicional; el cual permite realizar el movimiento de oposición con los otros dos dedos.

Se consideran movimientos de sujeción a aquellos que permiten el agarre de determinado objeto; manteniéndose entero o de forma parcial dentro de la mano. Los tipos de agarre involucran diferentes geometrías de diferentes tamaños. [40]

En la literatura se encuentran dos tipos de agarre: dactilar, en donde el objeto se sujeta únicamente con los extremos o las yemas de los dedos; y el envolvente, que consiste en sujetar un objeto con la parte interna de los dedos (palma de la mano). [41]

En la **tabla 3**, se muestran los dos tipos de agarre mencionados anteriormente y las sub-clasificaciones de estos.

**Tabla 3.** Tipos de agarre.

Dactilar	Puntual	Sujetar geometrías pequeñas y finas usando generalmente el pulgar y el índice.	
	Lateral	Se usa para sujetar objetos delgados y planos.	
envolvente	Palmar	Se utiliza para sujetar objetos con geometrías variables de mayor longitud.	
	Gancho	Utilizada para coger, levantar o jalar objetos.	
	Esférico	Empleada para sujetar objetos con una circunferencia definida.	
	Cilíndrico	Se basa en un agarre prensil de objetos con geometría continua.	

**Fuente:** ROMERO, I. P., & AARÓN, M. (2011). *Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servo-articulada aplicable como prótesis* (Doctoral dissertation).

## 2.2 Ojo humano

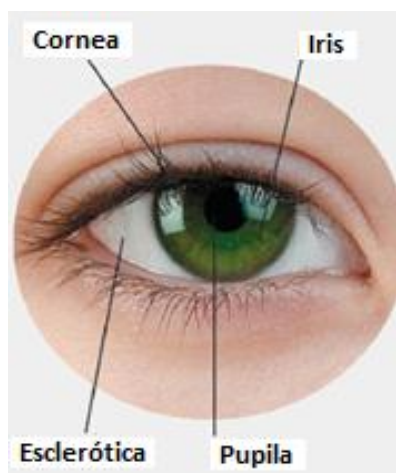
El ojo humano es un órgano encargado de detectar la luz y es la base del sentido de la vista. Su función consiste en transformar la energía lumínica en señales eléctricas, para posteriormente ser enviadas al cerebro por medio del nervio óptico.

El ojo humano posee una forma esférica y se encuentra colmado de un líquido gelatinoso y transparente llamado humor vítreo, el cual está comprendido entre la retina y el cristalino. El humor vítreo contribuye a mantener la superficie de la retina uniforme con el fin de que la recepción de imágenes sea nítida. [42]

### 2.2.1 Anatomía del ojo humano

El ojo humano es considerado uno de los órganos más complejos del ser humano, posee dos zonas una óptica y otra sensorial que conforman la parte más importante del ojo. [43] En la zona óptica como se evidencia en la **figura 32** posee las siguientes partes: córnea, iris, pupila y esclerótica.

*Figura 32. Esquema anatómico del ojo (zona óptica).*



**Fuente:** Partes y funcionamiento del ojo humano. URL: <http://www.apanovi.org.ar/iusaludparyfun.html>

**La córnea** es un tejido ubicado en la parte frontal transparente del ojo humano que permite la refracción y la transmisión de la luz. Su forma consiste en un lente cóncavo-convexo, y su grosor alcanza casi 1 mm en la periferia. [43]

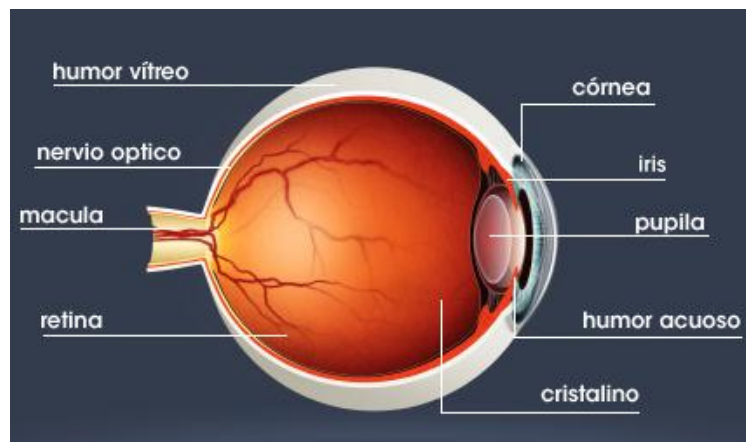
**El iris** es la membrana coloreada y circular del ojo que separa la cámara anterior de la cámara posterior. Y su función principal es controlar la cantidad de luz que penetra en el ojo. [43]

**La pupila** consiste en un orificio situado en el centro del iris por el que penetra la luz al interior del globo ocular. Su función es regular la cantidad de luz que llega a la retina, en la parte posterior del ojo. [43]

**La esclerótica** es una membrana de color blanco, resistente, gruesa y rica en fibras de colágeno que constituye la capa más externa del globo ocular. Su función es de dar forma y proteger los elementos internos del ojo. [43]

En la zona sensorial se encuentran las partes internas del ojo, como se muestra en la **figura 33**. Hay que tener en cuenta que el ojo humano posee más partes internas de las que se muestran en la **figura 32**, pero en este caso se mencionan las más relevantes. [43]

**Figura 33.** Esquema anatómico del ojo (zona sensorial).



**Fuente:** Partes y funcionamiento del ojo humano. URL: <http://www.apanovi.org.ar/iusaludparyfun.html>

**Nervio óptico** es un nervio sensitivo encargado de transmitir la información visual desde la retina hasta el cerebro. [43]

**Mácula** se encuentra localizada en la retina como una mancha amarilla, que se especializa en la visión fina de detalles. Esta parte del ojo permite reconocer caracteres para realizar acciones comunes como, por ejemplo: leer, distinguir caras, entre otros. [43]

**Retina** es un tejido sensible a la luz situado en la superficie interior del ojo. La retina libera una serie de fenómenos químicos y eléctricos (impulsos nerviosos), que son enviados hacia el cerebro por el nervio óptico. [43]

**Cristalino** es un componente del ojo humano con forma de lente biconvexa se encuentra situado en la parte posterior atrás del iris y delante del humor vítreo. Su función principal consiste en enfocar objetos situados a diferentes distancias. [43]

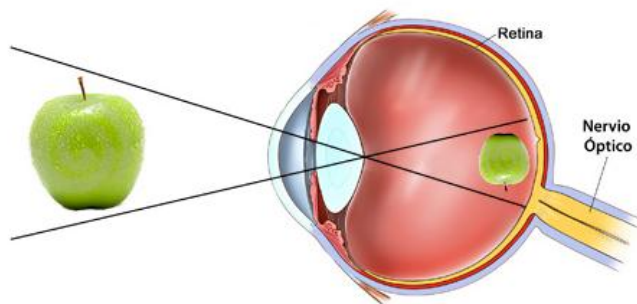
### 2.2.2 Formación de imágenes en el ojo

El ojo humano puede detectar un amplio rango de colores siempre y cuando no se encuentre en la oscuridad. Por ejemplo puede identificar objetos grandes y muy lejanos o incluso puede distinguir objetos muy pequeños como un grano de sal. [44]

La cornea es la parte por donde pasa la luz y se precede por el iris que actúa como un diafragma y define el color de los ojos. Este posee una abertura llamada pupila, la cual se encarga de controlar la cantidad de luz que se suministra al interior del ojo. [44]

El cristalino enfoca las imágenes en la superficie interna del ojo (retina), como se evidencia en la **figura 34**. Esta superficie posee fibras nerviosas que terminan en pequeñas estructuras conocidas como conos y batones sensibles a la luz (foto receptores). La fovea es el punto de la retina que tiene los conos, con el fin de detallar los objetos y ver el color de los mismos. En el día la fovea es considerada como la parte más sensible de la retina, ya que sobre ella se forma la imagen que se está observando. [44]

**Figura 34.** Imagen formada en la retina



**Fuente:** funcionamiento de la mano humana. URL: <http://www.fotonostra.com/digital/ojohumano.htm>

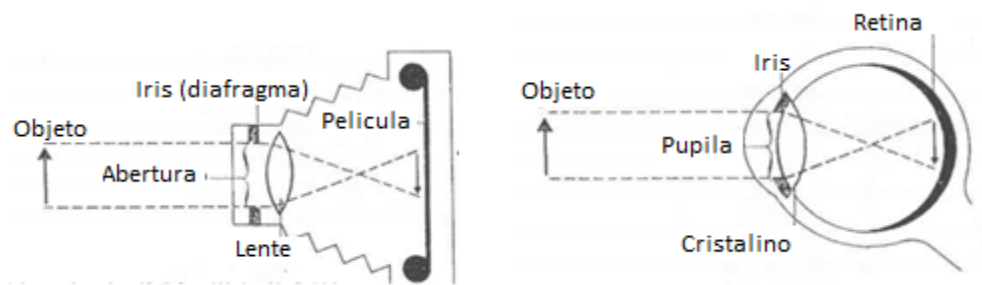
A nivel de la pupila se juntan millones de fibras nerviosas para formar el nervio óptico que sale de la retina por un punto el cual no posee sensibilidad ya que no posee fotoreceptores (punto ciego). [44]

La córnea desvía por refracción los objetos luminosos y el cristalino se ajusta para enfocar los objetos a diferentes distancias. El musculo ciliar se encarga de modificar la curvatura del cristalino. Por tanto para enfocar un objeto que esta próximo, los músculos ciliares se contraen y el grosor del cristalino aumenta, para así acortar la distancia focal de la imagen. Si por el contrario el objeto se encuentra lejos los músculos ciliares se relajan y la lente se adelgaza.

2.2.3 Similitudes entre el ojo y la cámara fotográfica

Teniendo en cuenta la *figura 35*. La cámara cuenta con un sistema de enfoque el cual permite registrar los objetos nítidamente, en cuanto al ojo posee una serie de partes que permiten conseguirlo. Por tanto se puede concluir que el ojo humano y la camara fotografica cuentan con varias semejanzas. Pero la diferencia entre los dos radica en la forma de obtener la informacion del abjeto capturado; mientras que en el ojo humano el cerebro indica lo que se ve, en la camara fotografica; se debe contar con un visor, que muestra la composicion de la fotografia. [45]

Figura 35. Esquematico del ojo y la camara fotografica.



Fuente: HUAMAN, L. D. B. Fotografía.

Las partes del ojo que son similares en cuanto a la obtención de imágenes de una cámara fotográfica, se evidencian en la *tabla 4*.

Tabla 4. Similitudes entre las partes del ojo y las de la cámara.

	Ojo	Cámara
Partes y similitudes	El iris del ojo está conformado por músculos circulares y radiados que permiten a la pupila dilatarse para reducir o aumentar la cantidad de luz que ingresa en el ojo.	La caja hermética al paso de luz permite el ingreso de rayos luminosos, los cuales son dirigidos al plano focal por medio del mecanismo de arrastre.
	El cristalino ajusta el enfoque de los objetos que se desean ver.	Por medio del lente se pueden enfocar los objetos, es decir alejarlos o acercarlos.
	La retina es la parte del ojo en donde se forma la imagen.	En la película se refleja la imagen que se desea captar.

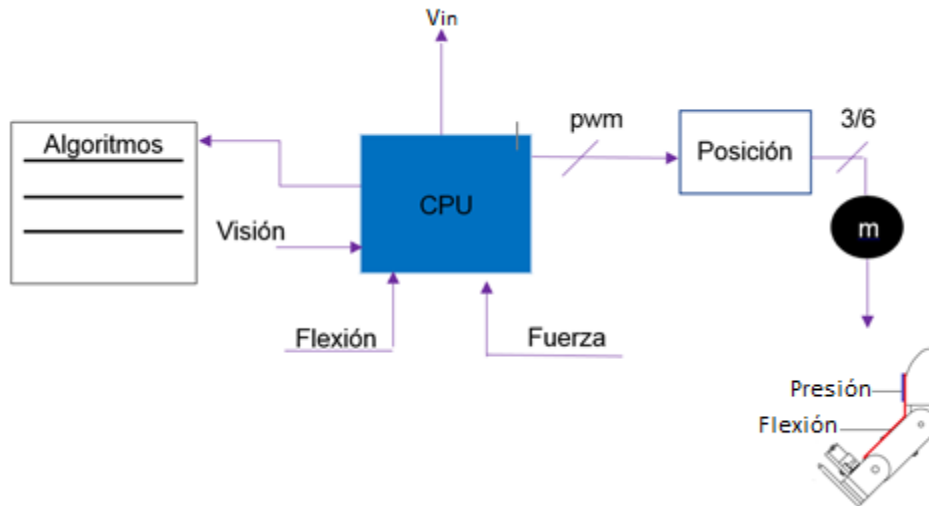
Fuente: Elaboración propia. .

# Capítulo 3 Gripper Robótico

## 3.1 Arquitectura general del sistema

El funcionamiento de cada uno de los dedos del gripper se realiza, como se indica en la **figura 36**.

*Figura 36. Arquitectura general del sistema.*



*Fuente: Elaboración propia. .*

Por medio de un sistema de visión el gripper analiza el tipo de objeto que debe sujetar y realiza un movimiento determinado dependiendo de la forma del mismo.

Utilizando el sensor de flexión se hace una comparación entre la posición en la que se encuentra cada uno de los dedos y la posición deseada para los mismos. La posición deseada se determina mediante el sensor de presión, el cual tiene valores predeterminados de acuerdo al objeto visualizado.

## 3.2 Sistema mecánico

Con el fin de construir el sistema mecánico del gripper se realizó el modelo cinemático para un dedo y su respectiva validación por medio de matlab®. Una vez obtenida esta validación se procede a crear el sistema de movimiento para cada uno de los dedos del gripper.

### 3.2.1. Modelo cinemático del sistema

La cinemática de un robot manipulador se basa en el estudio del movimiento con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen.



Suministrando así la descripción analítica del movimiento espacial en función del tiempo y la relación entre el extremo del manipulador y los valores de sus articulaciones. [46]

### 3.2.1.1. Métodos geométricos

Este método es válido para robots manipuladores de pocos grados de libertad y el procedimiento se basa en encontrar relaciones geométricas y trigonométricas sobre los elementos del gripper.

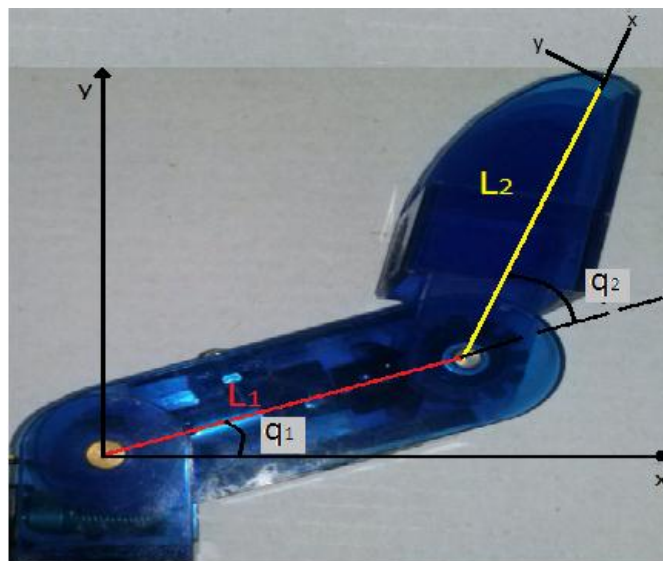
### 3.2.1.2. Cinemática directa

Consiste en determinar la posición y orientación del extremo final de un robot manipulador, con respecto a un sistema de referencia para ello se deben conocer los valores de las articulaciones y sus respectivos parámetros geométricos.

#### a. Dedos índice y medio

Con el fin de ubicar la posición y orientación final de los dedos índice y medio se utilizan las relaciones trigonométricas seno y coseno. En la **figura 37** se puede apreciar el diagrama de cuerpo libre para estos.

*Figura 37. Diagrama de cuerpo libre de los dedos índice y pulgar.*



*Fuente: Elaboración propia. .*

El valor de las coordenadas (x,y), se calculan mediante las ecuaciones (1) y (2). Teniendo en cuenta las longitudes de cada eslabón ( $l_1, l_2$ ) y las posiciones articulares ( $q_1, q_2$ ).

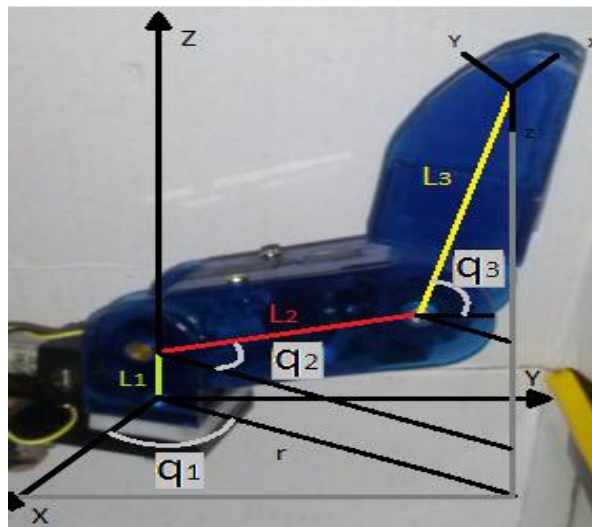
$$x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_2 + q_1) \quad (1)$$

$$y = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_2 + q_1) \quad (2)$$

### b. Dedo pulgar

Debido a que el dedo pulgar de la pinza posee un movimiento más el análisis de cinámica directa cambia según el diagrama de cuerpo libre mostrado en la **figura 38**.

**Figura 38.** Diagrama de cuerpo libre del dedo pulgar.



*Fuente: Elaboración propia. .*

Las ecuaciones (3), (4) y (5) permiten hallar las coordenadas (x,y,z), respectivamente.

$$x = r \cos q_1 \quad (3)$$

$$y = r \sin q_1 \quad (4)$$

$$z = l_1 + l_2 \sin q_2 + l_3 \sin (q_2 + q_3) \quad (5)$$

#### 3.2.1.3. Cinemática inversa

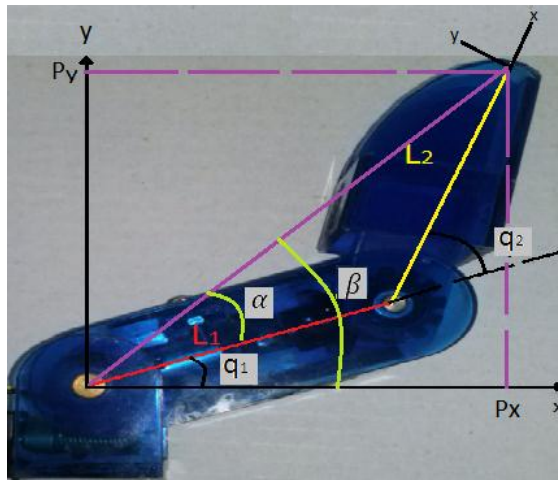
Se basa en determinar la configuración que debe tener el robot con el fin de alcanzar una posición y orientación conocida. [47]

### a. Dedos índice y medio

Con el propósito de encontrar la configuración que debe tener el manipulador para posicionarse en las coordenadas indicadas; se utilizan relaciones trigonométricas en las que intervienen las coordenadas articulares del gripper y las dimensiones físicas de sus elementos.

En la **figura 39** se evidencia el diagrama de cuerpo libre para los dedos índice y medio.

**Figura 39.** Diagrama de cuerpo libre de los dedos índice y pulgar.



**Fuente:** Elaboración propia. .

Teniendo en cuenta las coordenadas ( $p_x$ ,  $p_y$ ) y la longitud de cada uno de los eslabones; se procede a hallar los ángulos  $q_1$  y  $q_2$ . La ecuación (6) muestra el cálculo necesario para hallar  $q_1$ .

$$q_1 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sen q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2}\right) \quad (6)$$

Considerando que los eslabones se encuentran en un mismo plano y utilizando el teorema del coseno, se obtiene la ecuación (7) y (8).

$$\cos q_2 = \frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (7)$$

$$\text{sen } q_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_2} \quad (8)$$

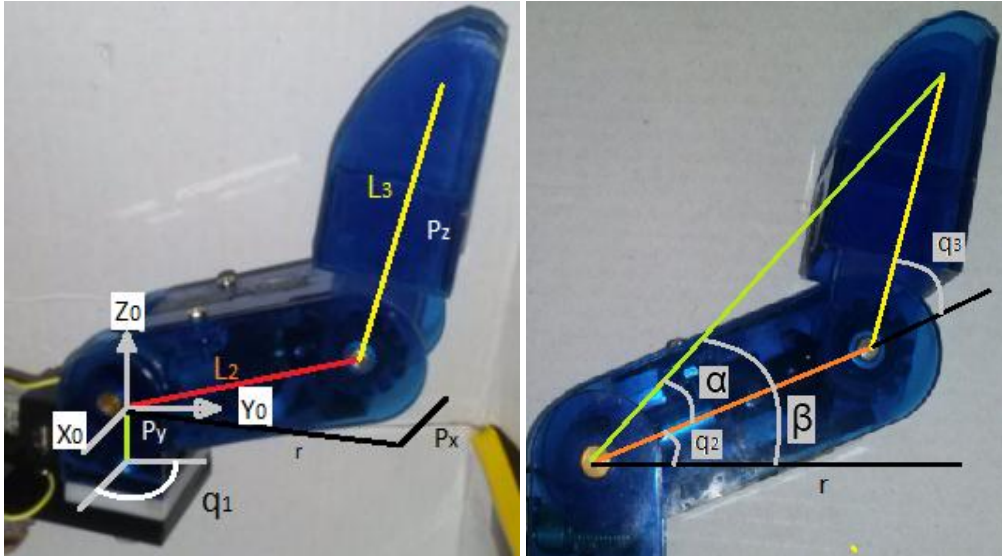
Dividiendo la ecuación (8) por  $\cos q_2$ , se obtiene la ecuación (9) para hallar  $q_2$ .

$$q_2 = \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_2}}{\cos q_2}\right) \quad (9)$$

## b. Dedo pulgar

Como se explicó anteriormente debido al diseño del dedo pulgar el diagrama de cuerpo libre cambia, como se muestra en la **figura 40**.

**Figura 40.** Diagrama de cuerpo libre del dedo pulgar.



**Fuente:** Elaboración propia. .

El valor de  $q_1$  se obtiene mediante la siguiente relación mostrada en la ecuación 10.

$$q_1 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad (10)$$

Ecuaciones (11) (12) (13) y (14) son usadas para hallar  $q_2$  y  $q_3$ .

$$r^2 = P_x^2 + P_y^2 \quad (11)$$

$$r^2 + P_z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \quad (12)$$

$$\cos q_3 = \frac{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (13)$$

$$\sin q_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3} \quad (14)$$

Dividiendo la ecuación (14) en los dos lados por  $\cos q_3$ , se consigue la ecuación (15) para hallar  $q_3$ .

$$q_3 = \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}}{\cos q_3}\right) \quad (15)$$

El cálculo de  $q_2$  se logra mediante la diferencia entre los ángulos beta y alfa como se muestra en la ecuación (16).

$$q_2 = \beta - \alpha \quad (16)$$

Con relaciones trigonométricas se obtienen los valores de beta y alfa mostrados en las ecuaciones (17), (18) y (19).

$$\beta = \arctan\left(\frac{P_z}{r}\right) \quad (17)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad (18)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sen q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right) \quad (19)$$

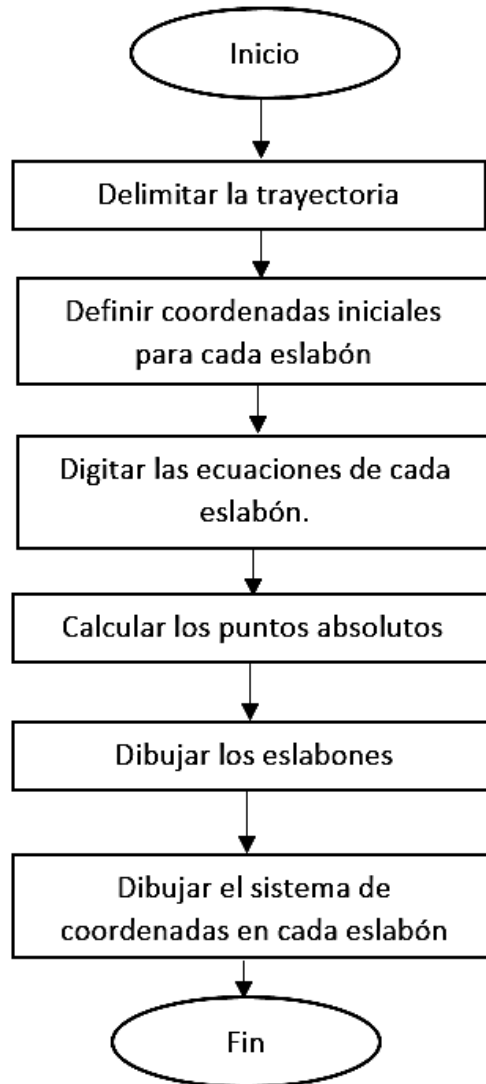
Ecuación para hallar  $q_2$  se realiza la diferencia entre beta y alfa como se muestra en la ecuación (20).

$$q_2 = \arctan\left(\frac{P_z}{\pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l_3 \sen q_3}{l_2 + l_3 \cos q_3}\right) \quad (20)$$

### 3.2.2. Modelo cinemático en matlab®

Con la intención de simular la cinemática del robot manipulador tipo gripper se realiza el diagrama de flujo mostrado en la **figura 41**. Para el cual se ejecutan siguientes pasos: en primer lugar, se define la trayectoria para los dos eslabones de un dedo desde 0° hasta 180° y sus coordenadas iniciales; en segundo lugar, se digitan las ecuaciones halladas en el análisis de cinemática directa para los dedos índice y medio; en tercer lugar, se calculan los puntos absolutos para así dibujar los eslabones; y finalmente se dibuja el sistema de coordenadas en cada uno de los puntos hallados anteriormente. En el **anexo 2** se muestra el código implementado en matlab®.

**Figura 41.** Diagrama de flujo modelo cinemático en matlab.

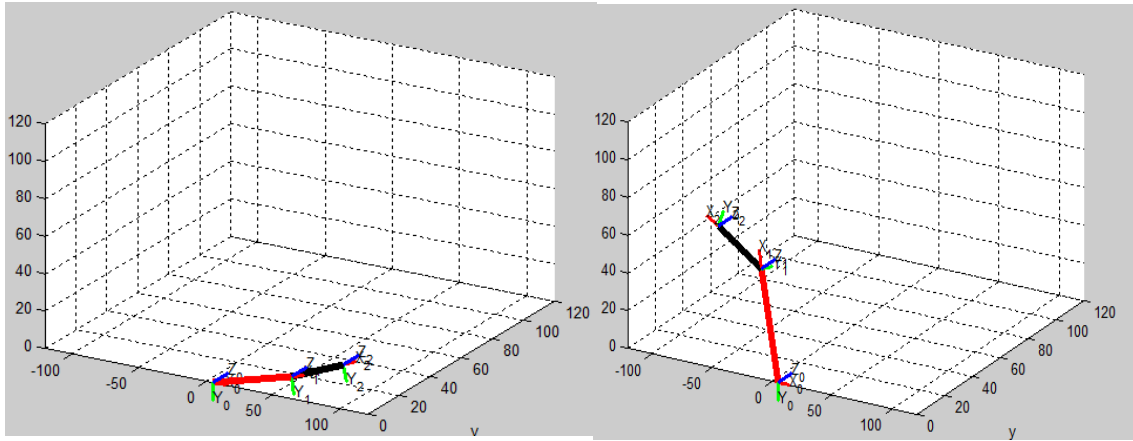


*Fuente:* Elaboración propia. .

### 3.2.3. Validación del modelo cinemático

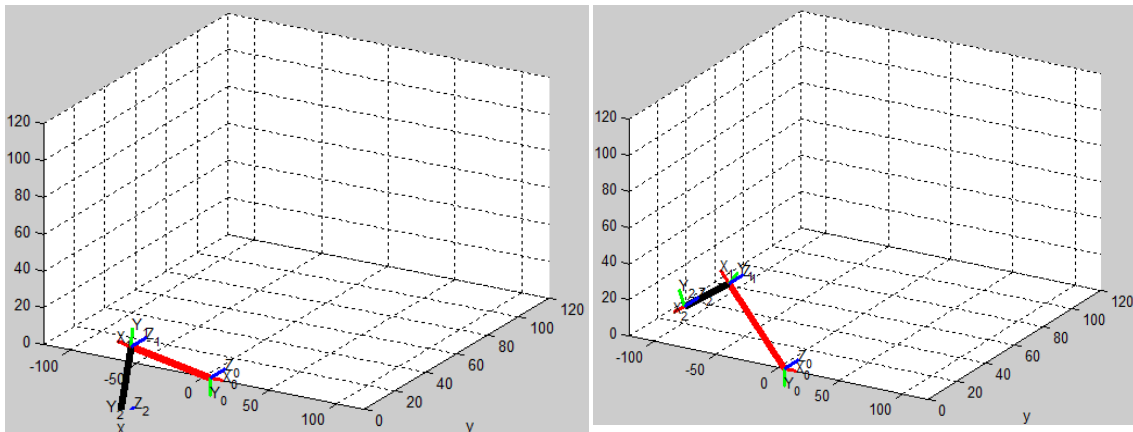
La validación del modelo cinemático se realizó solo para uno de los dedos, ya que la simulación para los demás es la misma. En la **figura 42 a-b-c-d**, se puede observar la simulación de un dedo con sus dos falanges en donde cada una se mueve 90°, esta simulación se obtiene mediante el software de matlab®, las medidas utilizadas para la simulación están dadas en milímetros.

**Figura 42.** Simulación en matlab®.



*a. Inicio*

*b. movimiento de las falanges distal y proximal*



*c. final de la trayectoria.*

*d. movimiento de las falanges distal y proximal*

**Fuente:** Elaboración propia. .

### 3.2.4. Diseño mecánico

Ya teniendo el modelo cinemático del gripper se procede a realizar el diseño mecánico que tiene como objetivo implementar un sistema capaz de reproducir los movimientos de la mano humana (oposición, flexión y extensión) utilizando solo los dedos: medio, índice y pulgar. Para desarrollar esto se deben cumplir los siguientes puntos:

- Diseño de un sistema mecánico con los tres dedos principales de la mano.
- Implementar un mecanismo que simule los movimientos de la mano humana.

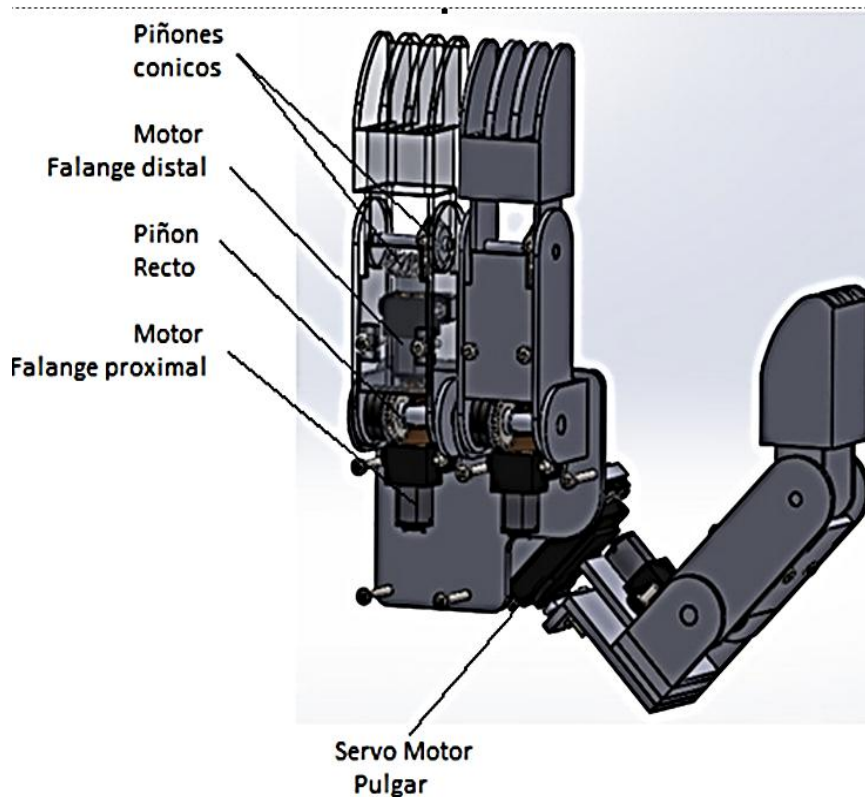


- Integración de sensores de presión y flexión en las falanges.

Para desarrollar un modelo que cumpliera con los requisitos planteados anteriormente, se desarrolló un sistema mecánico con ayuda de un paquete CAD de SolidWorks®. En donde fueron modeladas 62 piezas mecánicas.

En la **figura 43** se muestra los componentes mecánicos utilizados así como también las articulaciones de cada falange.

*Figura 43. Componentes mecánicos y dedos. SolidWorks®*



*Fuente: Elaboración propia. .*

### 3.2.4.1. Selección de los mecanismos implementados en los dedos del gripper

#### a. Falange proximal

Con el fin de seleccionar el sistema de transmisión de movimiento más propicio para la falange proximal se plantean tres alternativas en la **tabla 5**. [48]

Con el fin de lograr el movimiento de la falange proximal de cada uno de los dedos se selecciona el sistema corona tornillo sin fin debido a que este mecanismo ofrece auto bloqueo, diversos planos de movimiento y facilidad de espacio para la ubicación del motor en la palma de la pinza. Además de esto, este mecanismo posee alta reducción de velocidad característica que se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar un motor en el mercado nacional.

**Tabla 5.** Comparación de los sistemas mecánicos más utilizados en la transmisión de movimiento de pinzas robóticas.

Mecanismo	Descripción
Sistema Rueda dentada-Linterna	Posee un funcionamiento similar al de una transmisión por engranajes, logrando transferir el movimiento rotacional entre ejes perpendiculares o paralelos. Además logra modificar características de velocidad y sentido de giro del eje conductor. [48]
Corona-Tornillo sin fin	Este mecanismo permite transmitir el movimiento de rotación mediante dos ejes perpendiculares y se caracteriza por reducir la velocidad del eje conducido y aumentar el torque del motor. [48]
Tren de poleas	Se utiliza con el fin de conseguir reducción o aumento de velocidad de giro sin recurrir a diámetros excesivamente grandes o pequeños. [48]

**Fuente:** Elaboración propia.

#### b. Falange distal

Para la selección del mecanismo a utilizar en la falange distal se tuvo en cuenta dos tipos de engranajes cónicos. [49] Estos se explican en la **tabla 6**.

**Tabla 6.** Mecanismos para transmisión de movimiento entre ejes que se cortan.

Mecanismo	Descripción
Engranajes Helicoidales	Trasmiten el movimiento de los ejes que se cortan en un mismo plano generalmente un ángulo recto, más sin embargo pueden variar este ángulo a uno por ejemplo de 45° o 70°, entre otros. [49]
Engranajes Rectos	Puede transmitir el movimiento de dos ejes perpendiculares y son de un funcionamiento silencioso. [49]

**Fuente:** Elaboración propia.

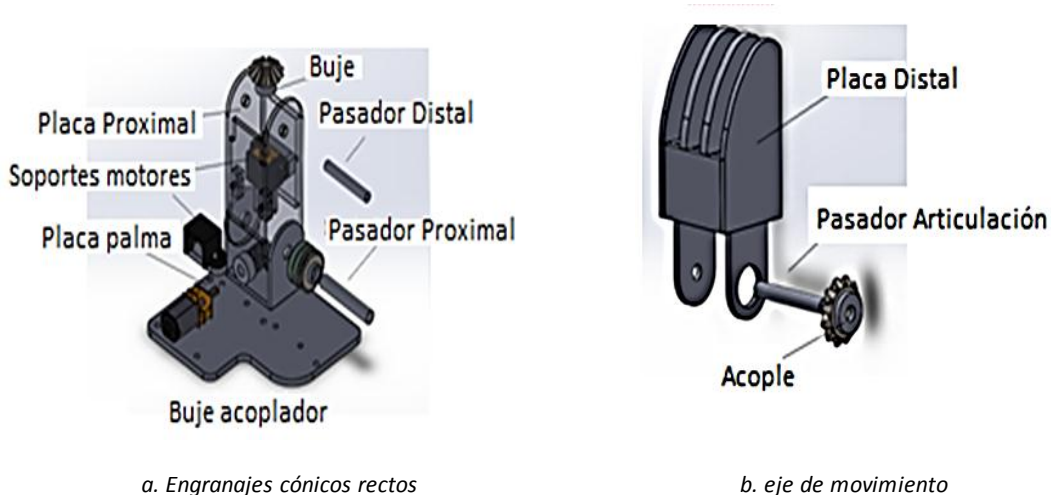
En cuanto al sistema seleccionado para la falange distal es un mecanismo de engranajes cónicos rectos, ya que poseen un menor desgaste, no necesitan generalmente mayor lubricación, no generan una fuerza axial que deba ser compensada y tienen un menor costo que los engranajes cónicos helicoidales.

### 3.2.4.2. Sistema mecánico para cada uno de los dedos del gripper

Las falanges distales y proximales del manipulador están unidas por medio de articulaciones rotacionales tipo bisagra con pasador. El movimiento de la falange distal posee un intervalo de movimiento entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , logrando así un movimiento total de  $180^\circ$ . En cuanto a la falange proximal con respecto a la palma, el movimiento se encuentra restringido en el intervalo de  $0^\circ$  a  $110^\circ$ . La manera de transmitir el movimiento entre las articulaciones de la falange distal y proximal es por medio de un sistema mecánico que consta de un motor acoplado a una transmisión entre ejes perpendiculares constituida por dos piñones cónicos rectos como se muestra en la **figura 44-a**.

Para el movimiento de la falange proximal de cada uno de los dedos se utilizó el mecanismo corona tornillo sin fin, con el propósito de cambiar de eje del movimiento del motor  $90^\circ$ . Como se ilustra en la **figura 44-b**. En el **anexo 3** se muestran los planos del gripper

**Figura 44.** Falanges distal y proximal. SolidWorks®



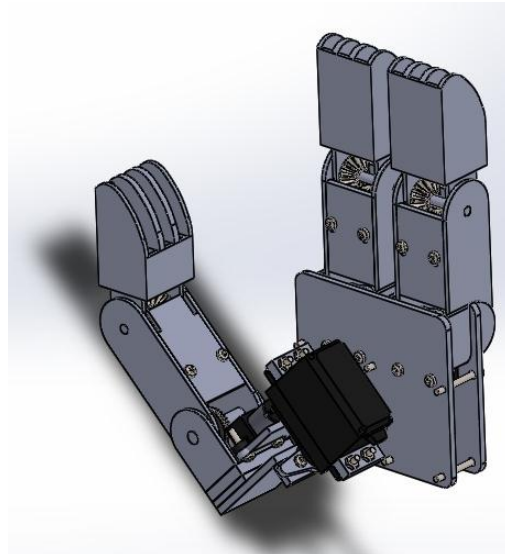
**Fuente:** Elaboración propia. .

### 3.2.4.3. Sistema mecánico para el movimiento de oposición del dedo pulgar

Como se muestra en la **figura 45** en la palma de la mano se implementó un servomotor MG996R capaz de producir el movimiento de oposición del dedo pulgar con respecto a los otros dos dedos índice y medio.

Se utilizó esta referencia debido a que en este tipo de aplicación no se requiere un servo motor que proporcione un gran rendimiento como es el caso de los Dynamixel o Herkulex. Por el contrario, el único requerimiento que se tuvo en cuenta a la hora de la selección es que su ángulo de funcionamiento estuviese entre 0° y 90°. En el **anexo 4**, se encuentran las hojas técnicas del motor Dynamixel y en el **anexo 5** las del Herkulex.

*Figura 45. Sistema mecánico implementado en el dedo pulgar. SolidWorks®*



*Fuente: Elaboración propia. .*

### 3.2.4.4. Análisis de esfuerzos por el elementos finitos del diseño mecánico

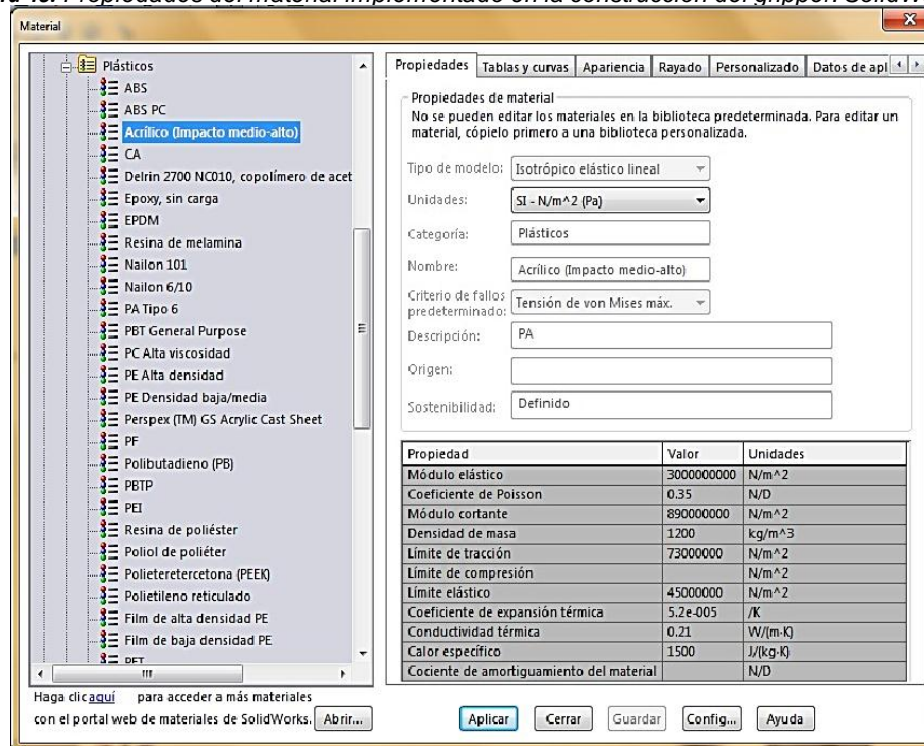
Se utilizan herramientas de análisis de esfuerzos para valorar si las piezas pueden romperse o deformarse. Éste análisis es capaz de calcular los desplazamientos, las deformaciones, y las tensiones en una pieza basándose en el material, las restricciones y las cargas.

Para determinar si ciertas piezas mecánicas iban o no a soportar las cargas se utilizó la herramienta Motion® del software de SolidWorks® el cual ejecuta el análisis de esfuerzos por el Método de Análisis de Elementos Finitos, para calcular el esfuerzo en cada una de las partes en donde el gripper hace contacto para sujetar diferentes tipos de objetos, como por ejemplo: en la sujeción de un cubo, una esfera, entre otros.

En este análisis se asume que el material es isotrópico, el cual se define a partir de las características mostradas a continuación. Las piezas seleccionadas en este análisis son aquellas que presentan las cargas más importantes en el sistema. Tales piezas son: falange proximal y falange distal.

El material utilizado en la construcción del manipulador tipo gripper es el polimetilmetacrilato debido a que es versátil a la hora de manipular ya que posee una densidad de  $1200 \text{ Kg/m}^3$ , no presenta daños durante largos periodos de tiempo y es un excelente aislante eléctrico. En la **figura 46** se muestran la propiedades del material utilizadas por el software de solidworks® para realizar el análisis de elementos finitos.

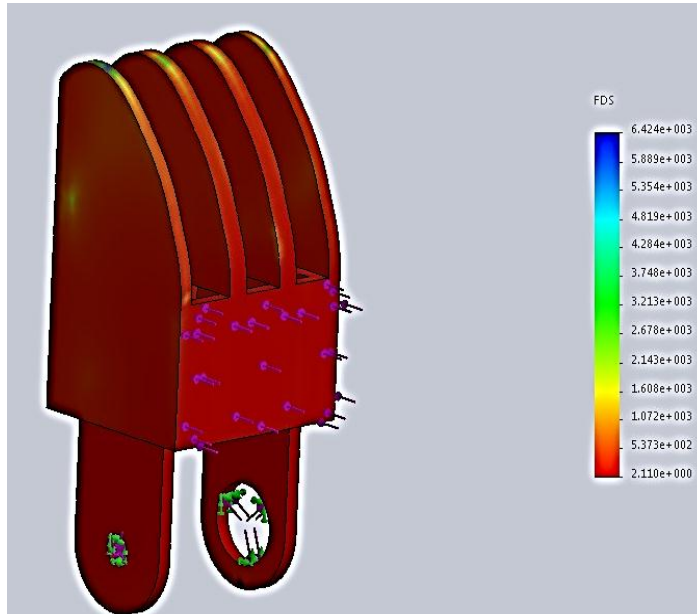
**Figura 46.** Propiedades del material implementado en la construcción del gripper. SolidWorks®



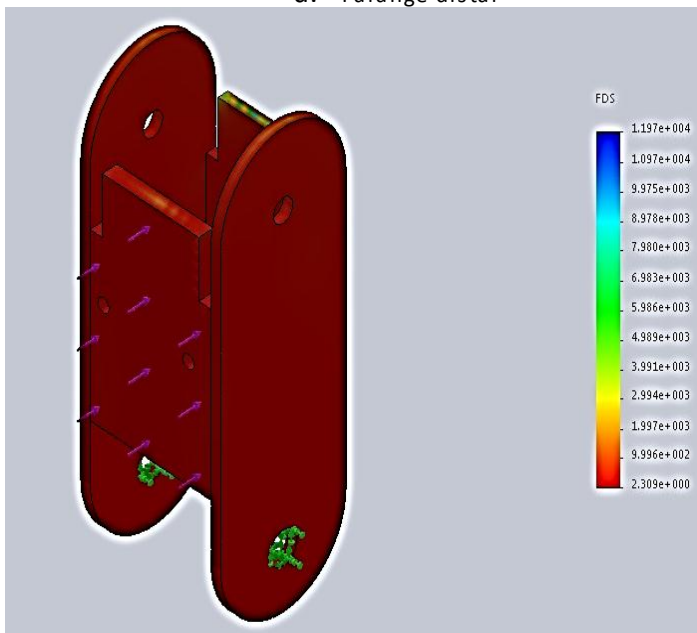
**Fuente:** Elaboración propia.

La fuerza es escogida de acuerdo al análisis del factor de seguridad realizado en la herramienta Motion del software de SolidWorks®, en donde la mayor carga soportada fue de 60N, al producir un factor de seguridad de 2.3 siendo este apropiado a la hora de garantizar que el material se encuentra en una zona segura sin sobrepasar su límite de elasticidad, como se muestra en la **figura 47**.

**Figura 47.** Factor de seguridad falanges proximal y distal. SolidWorks®



a. Falange distal



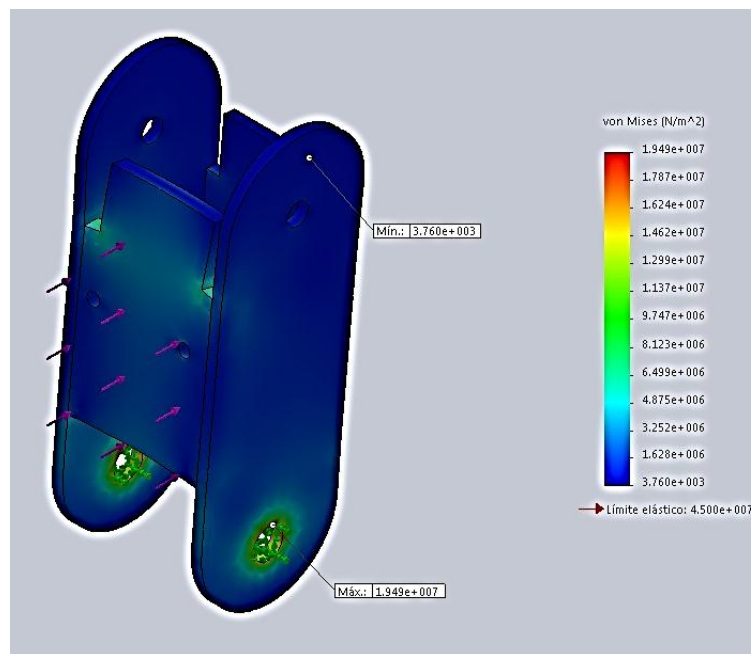
b. Falange proximal

*Fuente: Elaboración propia.*

En las **figuras 48 y 49** se puede observar la distribución de los esfuerzos en la falange proximal y falange distal. En cada una de estas piezas se observa una deformación mayor a la esperada debido a la escala que maneja la herramienta de simulación, con esto el diseñador puede apreciar en forma más clara el sentido de la deformación en cada una de las piezas.

Para la falange proximal se observa que los mayores valores de esfuerzo se encuentran en la zona de apoyo, comparados con los esfuerzos en la parte posterior de la pieza que son significativamente menores como se puede evidenciar en la **figura 48**.

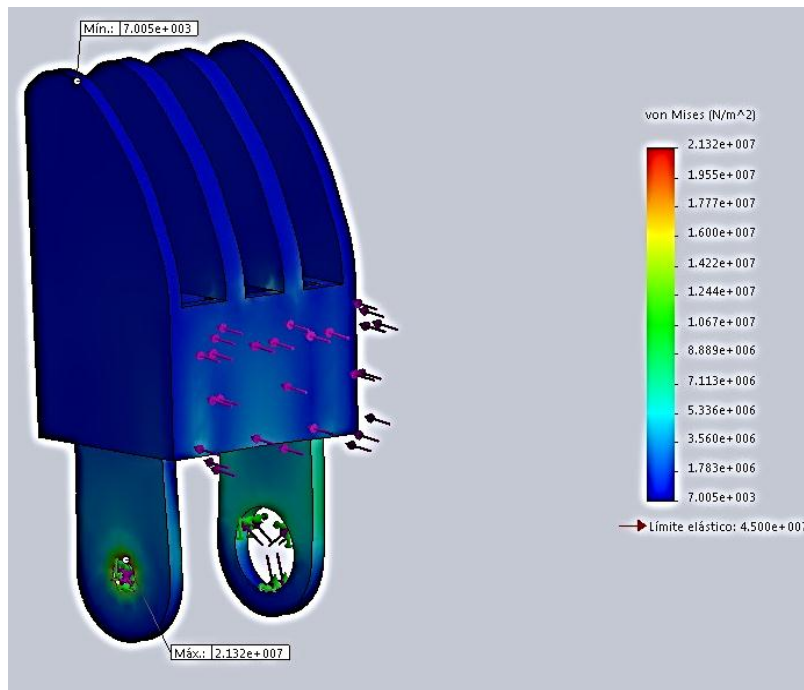
**Figura 48.** Falange proximal a escala 1:1. SolidWorks®



**Fuente:** Elaboración propia.

En la **figura 49** se evidencia que los esfuerzos generados en la zona de apoyo de la falange distal son mayores comparados con la parte frontal de la pieza.

**Figura 49.** Falange distal a escala 1:1. SolidWorks®



**Fuente:** Elaboración propia. .

Los resultados del análisis de esfuerzos de estas piezas se indican en la **tabla 7**, masa, esfuerzo y desplazamiento resultante máximo, así como el factor de seguridad. Este último señala la carga máxima permisible antes de que el material ceda y salga de la zona elástica (Límite elástico/ máxima carga permisible). Se puede observar que las falanges (distal y proximal) son capaces de soportar cargas de 6 kg sin ningún problema ya que el FDS se encuentra entre un rango óptimo de diseño estructural.

**Tabla 7.** Datos del análisis. SolidWorks®

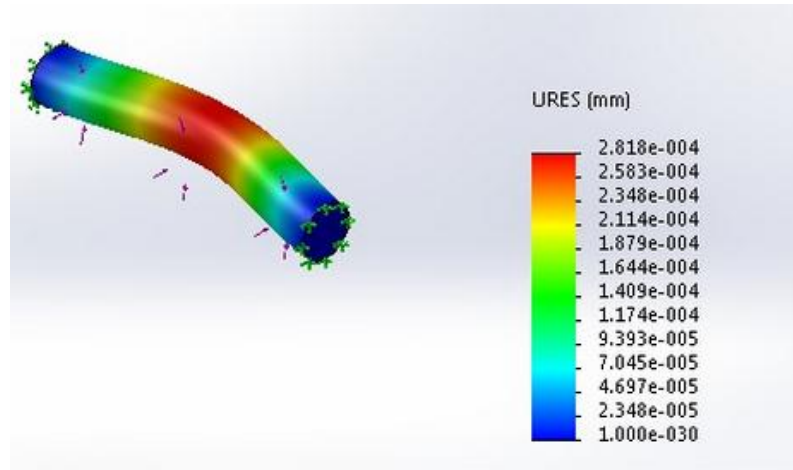
Pieza	Masa de la pieza	Esfuerzo resultante máximo	Desplazamiento resultante máximo	Factor de seguridad
Falange proximal	12.62 gramos	1.949 e+7 N/m <sup>2</sup>	0.0056 mm	1.74
Falange Distal	13.42 gramos	2.132 e+7 N/m <sup>2</sup>	0.00404 mm	1.15

**Fuente:** Elaboración propia.



El análisis por elementos finitos realizado al buje de los motores en la herramienta Motion del software de SolidWorks®; da como resultado un mayor esfuerzo localizado en el medio del pasador, tal y como se puede observar en la **figura 50**.

**Figura 50.** Análisis por elementos finitos del pasador1:1. SolidWorks®

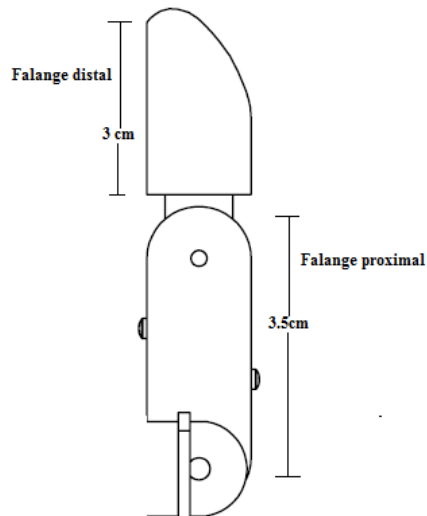


*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2.4.5. Cálculo del torque para los motores.

Con el fin de calcular el torque necesario para mover cada una de las falanges; se tiene en cuenta la medida de las mismas. Por tanto como se muestra en la **figura 51**, la falange distal tiene 3 cm de largo, mientras que la falange proximal tiene 3.5 cm.

**Figura 51.** Medidas Falanges.



*Fuente: Elaboración propia.*

En los dos casos se utiliza la ecuación 21 que corresponde a la fórmula de momentos. La cual indica en qué medida existe capacidad en una fuerza o sistema de fuerzas para cambiar el estado de la rotación del cuerpo alrededor de un eje que pase por dicho punto.

$$F \cdot d = M \quad (21)$$

En el caso de la falange distal se asumió una fuerza de  $0.43\text{kg/cm}^2$ , por tanto reemplazando en la ecuación 21 el torque necesario para mover y sujetar un objeto con esta falange es de  $1.29\text{ kg/cm}$ .

Para la falange proximal se asumió una fuerza menor; ya que esta falange es no realiza tanta fuerza a la hora de sujetar un objeto. La fuerza asumida es de  $0.35\text{kg/cm}^2$ , por lo cual el torque requerido es de  $1.22\text{kg/cm}$

### 3.3 Sistema electrónico

Para realizar la parte de actuación de los movimientos del gripper, fue necesario realizar una selección de varios dispositivos que cumplieran con esta función, en dicha selección se destacaron la tarjeta stm32f407 y el msp430, ya que fueron los más utilizados en el transcurso de la carrera, los cuales no necesitan componentes adicionales para su funcionamiento, y con su rendimiento pueden cumplir los requerimientos exigidos para aplicaciones con exactitud. En la **tabla 8** se muestra la descripción de la tarjeta stm32f407 y el msp430.

**Tabla 8.** Descripciones de la tarjeta stm32f407 y la launchpad MSP430.

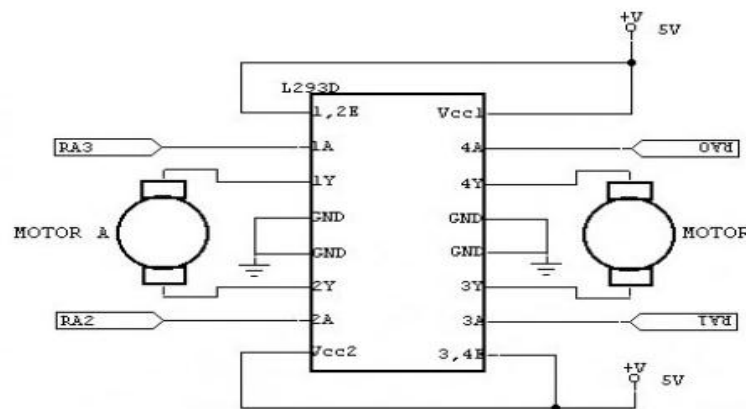
Dispositivo	Descripción
<b>STM32F407</b>	Tiene dos conectores machos de 2 por 25 pines, posee 24 canales ADC y cada uno soporta un máximo de 3.3V, posee una memoria flash de 1 MB Y una RAM de 192 KB. En adición a esto contiene 7 leds (4 de usuario, 2 de programación, 1 de comunicación), un acelerómetro LIS302DL o LIS3DSH y 2 pulsadores uno de reset y el otro para el usuario. [50]
<b>MSP430</b>	Tiene un total de 24 pines, posee 8 canales ADC y cada uno soporta un máximo de 3.6V, posee una memoria flash de 16 kB Y una RAM de 512B. Adicionalmente tiene 3 leds (2 programables y 1 de poder), un pulsador de reset y otro para el usuario. [51]
<b>Launchpad</b>	

**Fuente:** Elaboración propia.

Aunque las dos tarjetas tienen facilidad para realizar distintas pruebas ya que tienen componentes con los cuales el usuario puede interactuar, el costo de la unchpad es menor, pero para este proyecto la mejor opción es utilizar la tarjeta stm32f407, principalmente por el número de pines ya que para controlar el gripper son necesarios muchos, es más veloz, y cuenta con muchas más opciones para la realización de este proyecto a futuro ya que tiene muchos más canales ADC, esto sería muy fundamental a la hora de usar más sensores, también cuenta con un acelerómetro en su interior el cual posiblemente pueda ser utilizado en un futuro para saber la inclinación o en qué posición se encuentra el brazo robótico.

En la **figura 52** se muestra el circuito utilizado para la etapa de potencia, dicho circuito cuenta con el puente h L293D; con este dispositivo se puede realizar el movimiento de dos motores de corriente directa y puede entregar hasta 1 amperio por cada canal.

**Figura 52.** Circuito etapa de potencia.



**Fuente:** [http://www.suallabs.com/index.php?route=product/product&product\\_id=93](http://www.suallabs.com/index.php?route=product/product&product_id=93)

Con el fin de realizar distintos movimientos con los motores del gripper se debe contar con la tabla de la verdad.

En la **tabla 9** se muestra la entrada del circuito de potencia “EN”, mostrado en la **figura 50** de donde se deduce que siempre está en alto 1-Ay 2-A, que son las entradas por cada canal. Un ejemplo de esto se encuentra en el circuito de potencia de donde “RA0 y RA1” o “RA2 y RA3”, son las funciones a realizar dependiendo del valor de sus entradas.

**Tabla 9.** Tabla de verdad L293D

EN	1ª	2A	Función
H	L	H	Giro derecha
H	H	L	Giro Izquierda
H	L	L	Detención rápida
H	H	H	Detención rápida
L	X	X	Detención rápida

L: Bajo, H:Alto, X: No afecta

**Fuente:** <http://aprendiendo.laconeccion.com/l293d>

### 3.3.1 Actuadores

Son dispositivos capaces de proporcionar fuerza para desarrollar movimientos tanto lineales como angulares. La fuerza provocada por un actuador puede ser procedente de 3 **Fuentes**: hidráulica, neumática o eléctrica, y dependiendo del tipo de **Fuente** también se define el tipo de actuador. Las manos robóticas pueden ser desarrolladas en cualquiera de estos tres tipos de actuadores, en este caso serán utilizados actuadores eléctricos.

#### 3.3.1.1 Actuadores eléctricos

Entre estos actuadores eléctricos se encuentran los motor-reductores, siendo los más utilizados para el desarrollo de manos robóticas; estos motores son basados en motores de corriente continua. Cuentan con reductores o cajas reductoras, en las cuales se encuentra una combinación de engranajes, que buscan reducir su velocidad angular, para así dar mayor eficacia. [52]

Otro actuador eléctrico utilizado comúnmente es el servomotor, el cual es un dispositivo que se caracteriza por su capacidad de llegar a posiciones angulares específicas de forma inmediata, siempre y cuando este dentro de su rango de operación, para su funcionamiento el servomotor espera una serie de pulsos (señal pwm) los cuales indican el movimiento a realizar, y mientras la serie de pulsos no presente cambio, el servo permanece en el mismo estado. [52]

Un servomotor está compuesto por un potenciómetro, el cual va conectado al eje central del motor y tiene como función principal supervisar el ángulo actual en el que se encuentra el motor, el circuito de control; analiza el ángulo arrojado por el potenciómetro y el ángulo deseado, por tanto de no estar en la posición correcta hace que el motor realice los movimientos necesarios para poder llegar a ella, generalmente un servomotor tiene un movimiento angular entre 0º y 180º, pero

existen algunos capaces de llegar a los 210º, esto depende directamente del fabricante. [52]

### a. Motor reductor

Los motor-reductores son utilizados generalmente para aplicaciones donde se necesita reducir la velocidad de una forma segura y eficiente.

Los actuadores eléctricos más comunes de este tipo son hechos con motores de corriente continua, ya que cuentan con gran potencia, pero debido a su alta velocidad no se pueden utilizar en muchas aplicaciones de robótica, por esa razón se utilizan reductores o cajas reductoras, las cuales son basadas en una combinación de engranajes, que buscan disminuir su velocidad y dar mayor torque al motor.

En la **tabla 10**, se muestra una comparación entre 3 referencias de motor-reductores encontradas en el mercado colombiano.

**Tabla 10.** Referencias de motorreductores con su respectiva descripción.

Referencia	Descripción
12GBN20	Su voltaje de operación se encuentra entre 1.5 y 6 voltios, tiene una velocidad máxima de 60 rpm, un torque de 1.3kg/cm y un tamaño de 3.4cmX0.12cm. Su valor aproximado varía entre 10 y 15 mil pesos
LT37GB90-3540	Su voltaje de operación es de 24v, tiene una velocidad de 80 rpm, un torque de 7kg/cm y un tamaño de 2.1cmX3.7cm. Su valor aproximado varía entre 45 y 50 mil pesos
JGA25-370	Su voltaje de operación se encuentra entre 6 y 24 voltios, tiene una velocidad máxima de 42 rpm, un torque de 10kg/cm y un tamaño de 7.4cmX0.32cm. Su valor aproximado varía entre 33 y 37 mil pesos

Para este proyecto, se seleccionó el motor-reductor 12GBN20, ya que posee un tamaño pequeño y es fácil de adaptar a los sistemas mecánicos seleccionados. Y considerando que el material de la pinza es liviano, el torque y la velocidad que maneja este tipo de motor son apropiados para realizar los movimientos planteados, otro parámetro importante a la hora de seleccionarlo fue su bajo costo en el mercado. En el **anexo 6** se encuentra la hoja técnica de este motor.

En la **figura 53** se puede observar el motor seleccionado para este proyecto. [53]

**Figura 53.** Partes de moto-reductor.



**Fuente:** productos de electrónica. URL: [www.electronicaestudio.com](http://www.electronicaestudio.com)

## **b. Servomotor**

Un servomotor es un dispositivo el cual se caracteriza por su capacidad de llegar a posiciones angulares específicas de forma inmediata, siempre y cuando este dentro de su rango de operación, para su funcionamiento el servomotor espera una serie de pulsos (*señal pwm*), los cuales indican el movimiento a realizar, y mientras esta no presente cambio, el servo permanece en el mismo estado.

Un servomotor está compuesto por un potenciómetro, el cual va conectado al eje central del motor y tiene como función supervisar el ángulo actual en que se encuentra el motor, el circuito de control analiza el ángulo arrojado por el potenciómetro y el ángulo deseado, por lo que de no estar en la posición correcta el motor realiza los movimientos necesarios para poder llegar a la posición deseada. [54]

En la **figura 54** se muestra un servomotor desarmado, en ella se pueden ver las partes anteriormente mencionadas. En el **anexo 7** se puede ver su hoja técnica.

**Figura 544.** Servomotor.



**Fuente:** control de un servo motor. URL: [www.bairesrobotics.com](http://www.bairesrobotics.com)

## **3.3.2 Sensores**

Una de las acciones más complejas en cuanto a manos robóticas, es la capacidad de poder agarrar algo con una fuerza o presión regulada, dicha fuerza es supervisada

por la información táctil en contacto con el objeto, para de esta manera poder sujetar el objeto sin que se resbale o se rompa, una buena opción para cumplir con esta acción son sensores resistivos, los cuales pueden indicar la posición inicial y final del dedo, o sensores de fuerza para saber la presión a la que está siendo sometido el objeto.

### **a. Sensores resistivos**

Este tipo de sensores varían el valor de su resistencia de acuerdo a un parámetro físico, un ejemplo son los sensores flexibles los cuales dependiendo de la flexión a la que se encuentren sometidos, varían el valor de su resistencia.

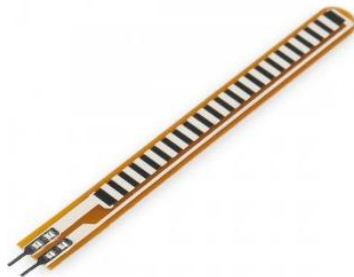
Otro ejemplo de sensores resistivos, son los sensores de fuerza, los cuales tienen un pequeño tamaño y cuentan con una superficie específica de contacto, en la cual varia el valor de su resistencia de acuerdo a la fuerza o presión que se le sea aplicada en esta área.

### **b. Sensor de flexión o galga extensiométrica**

Esta clase de sensor varía el valor de su resistencia de acuerdo a la flexión a la que se encuentre sometido, es decir a medida que es flexionado su resistencia aumenta y en su estado inicial la resistencia toma el valor mínimo. En la **figura 55** se muestra el sensor flexible de 114 mm. Este tipo de sensor se incursiono en el proyecto con el fin de saber la posición en la que se encuentra cada dedo. [55]

En el **anexo 8** se muestra la hoja técnica del sensor de flexión.

*Figura 555. Sensor flexible.*



*Fuente: Sensores URL: [www.reflexiona.biz](http://www.reflexiona.biz)*

### **c. Sensor de fuerza resistivo**

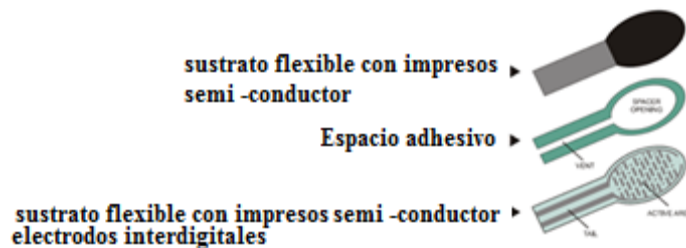
Es un pequeño sensor con una superficie específica de contacto, en la cual varia el valor de su resistencia de acuerdo a la fuerza o presión que le sea aplicada en esta

área, cuando no es presionado, su resistencia es mayor a  $1M\Omega$ , su rango de fuerza puede variar entre 100 gramos a 10Kg (estos valores dependen de tamaño y fabricante).

En la **figura 56** se muestra cada una de las partes del sensor de fuerza, junto con especificación de su área de activación [56]

En el **anexo 9** se muestra la hoja técnica del sensor de fuerza.

*Figura 56. Partes sensor de fuerza resistivo*



*Fuente: Sensores URL: [www.reflexiona.biz](http://www.reflexiona.biz)*

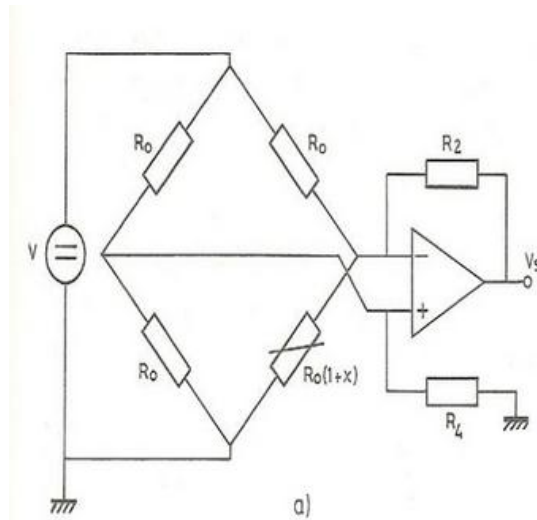
#### **d. Acondicionamiento de señal**

El acondicionamiento de la señal de los sensores se realizó mediante un puente de wheatstone; el cual es un circuito orientado a corregir problemas de linealidad y sensibilidad. Para leer la salida de dicho puente fue necesario de un amplificador diferencial, el cual genera una única salida de voltaje que posteriormente llega al controlador.

En la **figura 57**, se muestra el circuito de un puente de wheatstone junto con un amplificador diferencial, el cual tiene una salida de voltaje “vs” para la tarjeta controladora.



**Figura 577.** Puente wheatstone con amplificador diferencial.



**Fuente:** acondicionamiento de sensores URL:<http://acondicionadores.obolog.es/linealidad-circuito-electronico-74981>

Al usar la segunda ley de Kirchhoff o también llamada ley de mallas, se generan las ecuaciones 22 y 23, respectivamente. Ya que esta ley dice que el voltaje en cada circuito cerrado debe ser cero "0".

$$V - I_1 \cdot R_0 - I_1 \cdot R_0 = 0 \quad (22)$$

$$V - I_2 \cdot R_0 - I_2 \cdot R_0(1 + x) = 0 \quad (23)$$

De la ecuación 22 se factoriza y despeja ' $i_1$ '. Se realiza la misma operación con ' $i_2$ ' en la ecuación 23, generando así las ecuaciones 24 y 25 respectivamente.

$$I_1 = \frac{V}{2R_0} \quad (24)$$

$$I_2 = \frac{V}{R_0 + R_0(1 + x)} \quad (25)$$

Al amplificador diferencial llegan dos entradas de voltaje "V+" y "V-", para saber el valor en estos dos puntos es necesario utilizar la ley de ohm como se muestra en las ecuaciones 26 y 27.

$$V_+ = R_o * I1 \quad (26)$$

$$V_- = R_o * I2 \quad (27)$$

Al reemplazar las ecuaciones 29 y 30, en las ecuaciones 31 y 32 da como resultado las ecuaciones 28 y 29.

$$V_+ = R_o * \frac{V}{2R_o} \quad (28)$$

$$V_- = R_o * \frac{V}{R_o + R_o(1+x)} \quad (29)$$

Como el voltaje de salida “V<sub>s</sub>” es igual a la diferencia entre el voltaje ubicado en la entrada positiva “V+” y la entrada negativa “V-”, de los cuales ya se conoce el valor en las ecuaciones 28 y 29, arroja como resultado en la ecuación 30 el valor de salida.

$$V_s = R_o * \frac{V}{2R_o} - R_o * \frac{V}{R_o + R_o(1+x)} \quad (30)$$

### 3.4 Programación

El programa principal se divide en dos partes: primera, realizar la configuración de tres ítems importantes como los son: variables de entrada y salida del sistema; velocidad de comunicación y PWM. Y segunda determinar el movimiento o la sujeción que debe hacer el gripper según el sistema de visión.

El pseudocódigo utilizado en el programa principal se muestra a continuación y su diagrama de flujo correspondiente se puede observar en el **anexo 10**:

#### Programa principal'

```

Declarar variables.
Configurar entradas y salidas.
Configuración velocidad de comunicación.
Configuración PWM.
Mientras (1)
    K ← dato recibido.
    Si (K=1)
        Función cerrar mano.

```

```

        Fin si
        Si (K=2)
            Función cruzado1.
        Fin si
        Si (K=3)
            Función cruzado2.
        Fin si
        Si (K=4)
            Función coger pelota.
        Fin si
        Si (K=5)
            Función coger caja.
        Fin si
    Fin Mientras
Fin

```

El programa principal posee cinco subrutinas que son explicadas una a una a continuación.

Al ser la pinza abierta, la posición referente para cada uno de los movimientos permite que todas las subrutinas posean una segunda parte que busca llevar a la pinza a dicha posición. Inicialmente se activa el motor superior del dedo 3 en dirección de apertura, dicho movimiento es controlado mediante un condicional; el cual paso a paso va capturando el valor en el que se encuentra el sensor de flexión y lo compara con el guardado en la primera parte. Cuando el nuevo valor supera al de la primera parte, realiza la misma acción con las otras dos falanges, para posteriormente activar los motores inferiores de los tres dedos y dejar el servo en su posición inicial.

En el **anexo 11** se encuentra el diagrama de flujo de la función cerrar mano, en dicha función inicialmente se mueve el servo a un ángulo de alrededor de 45°, se activan los motores inferiores en dirección cierre de los dedos 1 y 2 hasta cuando estos lleguen al límite de su recorrido, ya completada esta acción se guarda en una variable aparte el valor en el que se encuentran los sensores de flexión de estos dos dedos, luego se procede a activar los motores superiores en dirección de cierre e igualmente llevando las falanges hasta el límite de su recorrido. Ya teniendo estos dos dedos completamente cerrados se activa el motor inferior del dedo 3 hasta cuando haga contacto con los otros dos, e igualmente se guarda el valor del sensor de flexión para posteriormente cerrar la falange superior.

Su pseudocódigo correspondiente es:

#### **Función cerrar mano**

```
Mover servo a ángulo específico.
Activar motores inferiores falanges 1 y 2 en dirección cierre.
Capturar valores ADC flex 1 y 2.
Activar motores superiores falanges 1 y 2 en dirección cierre.
Activar motor inferior falange 3 en dirección cierre.
Capturar valor ADC flex 3.
Activar motor superior falange 3 en dirección cierre.
Capturar nuevo valor ADC flex3.
Mientras (Nvf3>vf3)
    Activar motor superior falange 3 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex3.
Fin Mientras
Activar motor inferior falange 3 en dirección de apertura.
Capturar nuevo valor ADC flex2.
Mientras (Nvf2>vf2)
    Activar motor superior falange 2 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex2.
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex1.
Mientras (Nvf1>vf1)
    Activar motor superior falange 1 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex1.
Fin Mientras
Activar motor inferior falanges 1 y 2 en dirección de apertura.
Retornar servo a posición inicial.
```

**Fin**

En el **anexo 12** se encuentra el diagrama de flujo de la función cruzado 1, en dicha función se busca realizar el contacto entre los dedos medio y pulgar (o 1 y 3), inicialmente se mueve el servo a un ángulo de alrededor de 120°, se activan los motores inferiores en dirección cierre de los dedos 1 y 3 hasta cuando lleguen a un ángulo de alrededor de 50°, ya completada esta acción se guarda en una variable aparte el valor en el que se encuentran los sensores de flexión de estos dos dedos, luego se procede a activar los motores superiores en dirección de cierre hasta cuando allá contacto entre las dos falanges. Y en el **anexo 13** se evidencia el diagrama de flujo para la función cruzado 2, el cual es parecido al cruzado 1; con la excepción de que los dedos que se unen son los dedos pulgar e índice.

A continuación se muestran los pseudocódigos correspondientes a las dos subrutinas cruzado1 y cruzado 2

#### **Función cruzado1**

```
Mover servo a ángulo específico.
Activar motores inferiores falanges 1 y 3 en dirección cierre.
Capturar valores ADC flex 1 y 3.
Activar motores superiores falanges 1 y 3 en dirección cierre.
Capturar nuevo valor ADC flex3.
Mientras (Nvf3>vf3)
    Activar motor superior falange 3 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex3.
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex1.
Mientras (Nvf1>vf1)
    Activar motor superior falange 1 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex1.
Fin Mientras
Activar motor inferior falanges 1 y 3 en dirección de apertura.
Retornar servo a posición inicial.
```

**Fin**

#### **Función cruzado2**

```
Mover servo a ángulo específico.
Activar motores inferiores falanges 2 y 3 en dirección cierre.
Capturar valores ADC flex 2 y 3.
Activar motores superiores falanges 2 y 3 en dirección cierre.
Capturar nuevo valor ADC flex3.
Mientras (Nvf3>vf3)
    Activar motor superior falange 3 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex3.
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex2.
Mientras (Nvf2>vf2)
    Activar motor superior falange 2 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex2.
Fin Mientras
Activar motor inferior falanges 2 y 3 en dirección de apertura.
Retornar servo a posición inicial.
```

**Fin**

En el **anexo 14** se encuentra el diagrama de flujo de la función coger pelota, inicialmente se mueve el servo a un ángulo de alrededor de 90°, se activan los motores inferiores en dirección cierre de los dedos 1,2 y 3 hasta cuando lleguen a un ángulo de alrededor de 45°, ya completada esta acción se guarda en una variable aparte el valor en el que se encuentran los sensores de flexión de estos tres dedos, luego se procede a activar los motores superiores en dirección de cierre controlándolo mediante un condicional, el cual paso a paso va capturando el valor en el que se encuentra el sensor de presión y lo compara con el valor de la presión deseada, así cuando el nuevo valor supera al deseado, se detienen los motores. Este diagrama también fue utilizado para la función coger caja. Por tanto los dos pseudocódigos son:

### Función coger pelota

```

Mover servo a ángulo específico.
Activar motores inferiores falanges 1,2 y 3 en dirección cierre.
Capturar valores ADC flex 1,2 y 3.
Activar motores superiores falanges 1,2 y 3 en dirección cierre.
Colocar valores deseados de presión 1,2y3.
Presfin ← 1
Mientras (Presfin=1)
    Capturar nuevo valor ADC pres 1, 2 y 3
    Si (Npres1 < pres1)
        Activar motor superior falange 1 en dirección de cierre.
        Pres1fin ← 0
    Sino
        Pres1fin ← 1
    Fin si
    Si (Npres2 < pres2)
        Activar motor superior falange 2 en dirección de cierre.
        Pres2fin ← 0
    Sino
        Pres2fin ← 1
    Fin si
    Si (Npres3 < pres3)
        Activar motor superior falange 3 en dirección de cierre.
        Pres3fin ← 0
    Sino
        Pres3fin ← 1

```

```

    Fin si
    Si (pres1fin=1 && pres2fin=2 && pres3fin=3)
        Presfin ← 2
    Fin si
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex3.
Mientras (Nvf3>vf3)
    Activar motor superior falange 3 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex3.
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex2.
Mientras (Nvf2>vf2)
    Activar motor superior falange 2 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex2.
Fin Mientras
Mientras (Nvf1>vf1)
    Activar motor superior falange 1 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex1.
Fin Mientras

Activar motor inferior falanges 1, 2 y 3 en dirección de apertura.
Retornar servo a posición inicial.
Fin

```

En el **anexo 15** se puede evidenciar el diagrama de flujo de la función coger caja

### **Función coger caja**

```

Mover servo a ángulo específico.
Activar motores inferiores falanges 1,2 y 3 en dirección cierre.
Capturar valores ADC flex 1,2 y 3.
Activar motores superiores falanges 1,2 y 3 en dirección cierre.
Colocar valores deseados de presión 1,2y3.
Presfin ← 1
Mientras (Presfin=1)
    Capturar nuevo valor ADC pres 1, 2 y 3
    Si (Npres1 < pres1)
        Activar motor superior falange 1 en dirección de cierre.

```

```

        Pres1fin←0
    Sino
        Pres1fin←1
    Fin si
    Si (Npres2 < pres2)
        Activar motor superior falange 2 en dirección de cierre.
        Pres2fin←0
    Sino
        Pres2fin←1
    Fin si
    Si (Npres3 < pres3)
        Activar motor superior falange 3 en dirección de cierre.
        Pres3fin←0
    Sino
        Pres3fin←1
    Fin si
    Si (pres1fin=1 && pres2fin=2 && pres3fin=3)
        Presfin←2
    Fin si
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex3.
Mientras (Nvf3>vf3)
    Activar motor superior falange 3 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex3.
Fin Mientras
Capturar nuevo valor ADC flex2.
Mientras (Nvf2>vf2)
    Activar motor superior falange 2 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex2.
Fin Mientras
Mientras (Nvf1>vf1)
    Activar motor superior falange 1 en dirección de apertura.
    Capturar nuevo valor ADC flex1.
Fin Mientras

Activar motor inferior falanges 1, 2 y 3 en dirección de apertura.
Retornar servo a posición inicial.

Fin

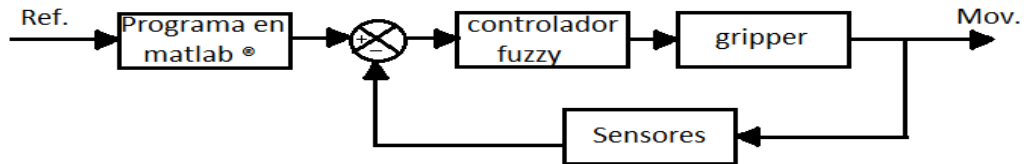
```



### 3.5 Control del sistema

El manipulador tipo gripper posee un sistema de control en lazo cerrado ya que se necesita hacer una comparación entre la presión deseada sobre el objeto y el valor actual en el que se encuentra el sensor de fuerza. Este control se puede observar en la **figura 58**.

**Figura 588.** Control de lazo cerrado del sistema.

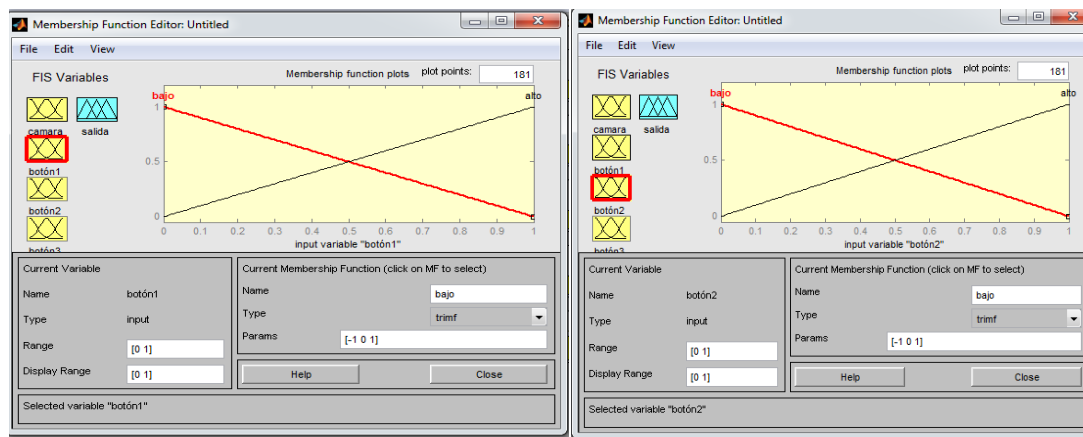


**Fuente:** Elaboración propia. .

Como se muestra en la **figura 59** el sistema cuenta con un controlador basado en el método de lógica difusa; el cual selecciona el tipo de movimiento a realizar dependiendo del objeto identificado en el procesamiento de imágenes o el botón seleccionado por el usuario.

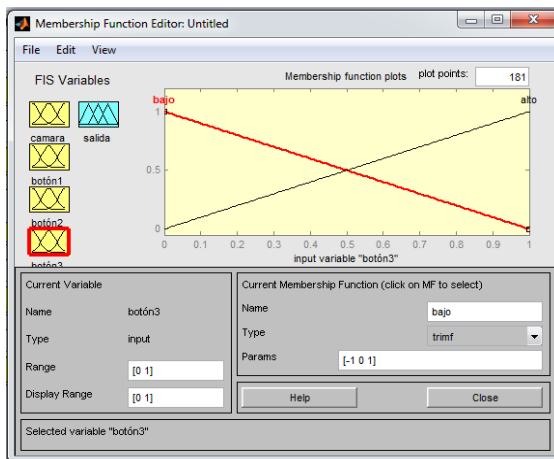
El controlador posee tres entradas las cuales son: cámara, botón1, botón2 y botón3. De donde los botones 1, 2 y 3, poseen dos funciones de membresía (alto, bajo) y la cámara posee tres funciones de membresía (nada, cubo, esfera). En la **figura 59** se evidencian las entradas descritas anteriormente.

**Figura 59.** Entradas del controlador. matlab®

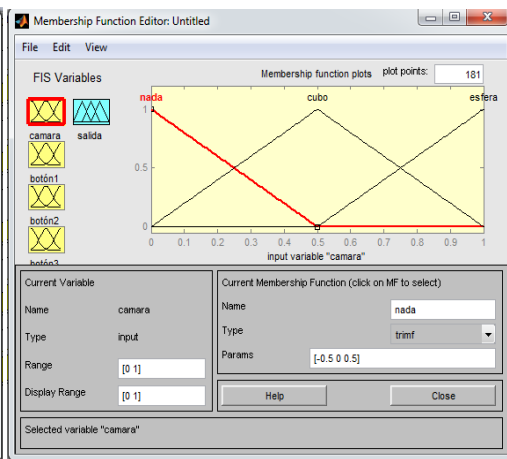


a. Botón 1

b. Botón 2



a. Botón 3



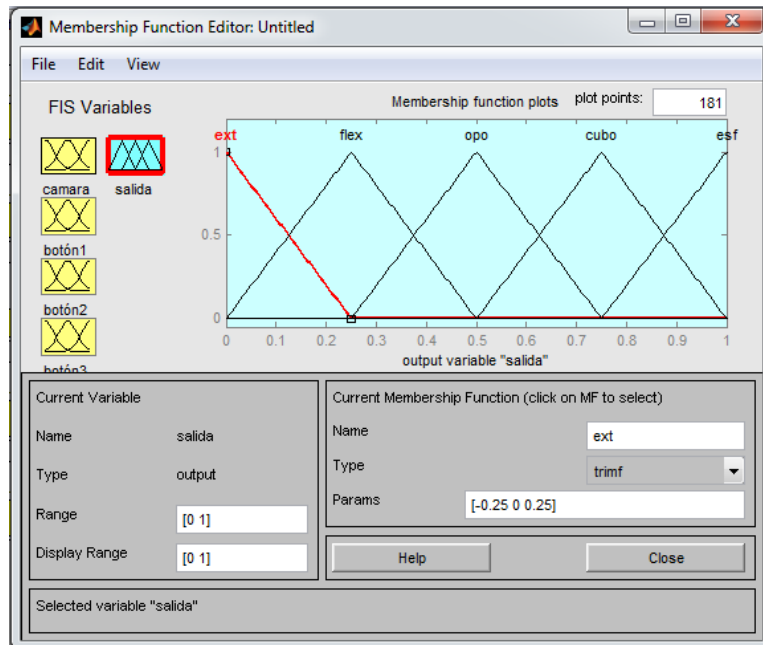
d. Cámara

*Fuente: Elaboración propia. .*

En cuanto a las salidas posee una con cinco funciones de membresía; que corresponden a sujetar esfera o cubo y a los movimientos de flexión, extensión y oposición, como se muestra en la **figura 60**.

Este controlador se implementó en el toolbox fuzzy® del software de matlab®.

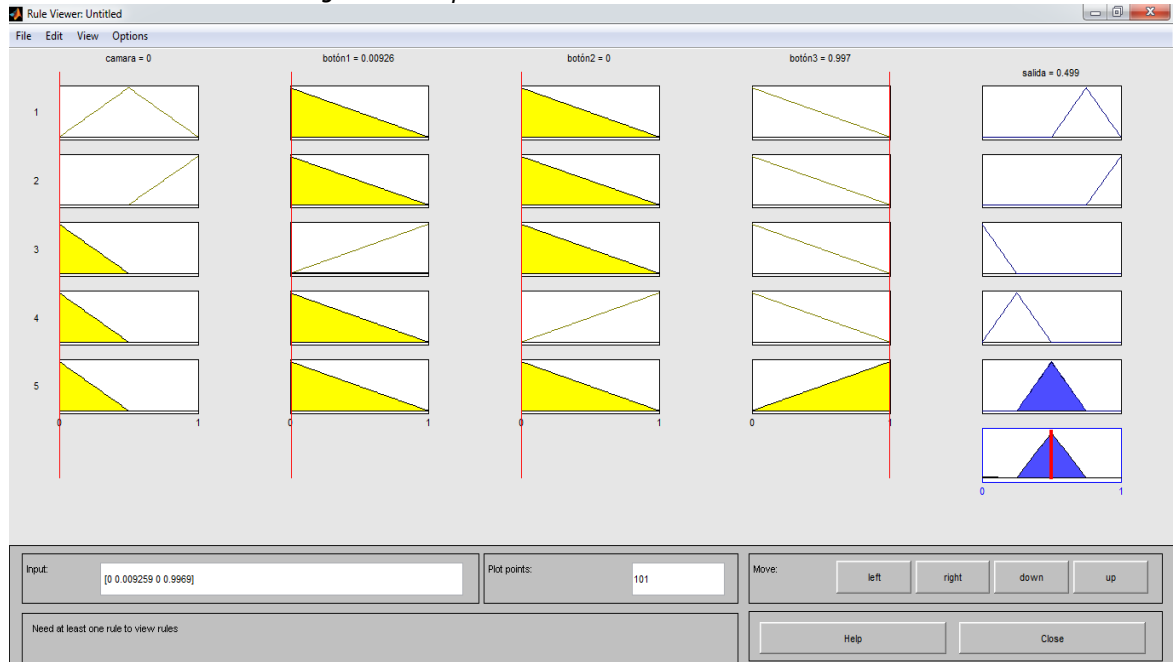
**Figura 60.** Entradas del controlador. matlab®



*Fuente: Elaboración propia. .*

En la **figura 61** se observan las respuestas de este sistema de acuerdo a las reglas implementadas en el controlador, las cuales se evidencian en el **anexo 16**.

**Figura 61.** Respuestas del controlador. matlab®



**Fuente:** Elaboración propia. .

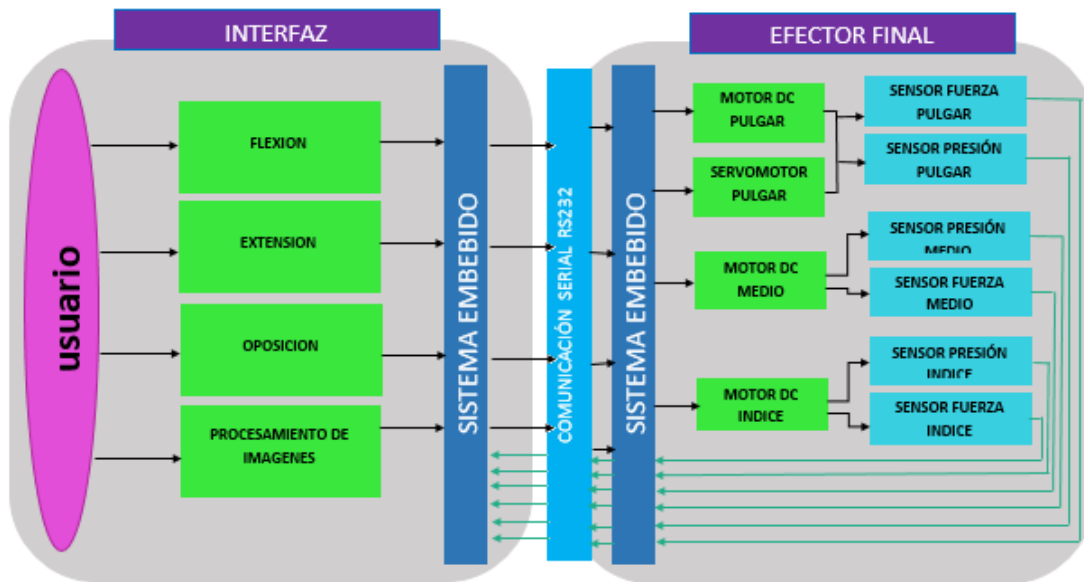
El sistema usuario-gripper se basa en una interfaz gráfica que cuenta con dos ítems: el primero de estos es: el procesamiento de imágenes, con la finalidad de reconocer el tipo de objeto que el gripper va a sujetar; y el segundo se refiere a los tres botones que posee esta interfaz con el fin de realizar los movimientos de oposición, flexión y extensión.

Para realizar la comunicación entre la interfaz y el manipulador o efector final, se utiliza la comunicación serial por medio de RS232; el cual envía una serie de datos dependiendo de la acción que el usuario desee realizar.

El efector final posee tres motores DC, para cada uno de los tres dedos y un servomotor, para el dedo pulgar. Además de esto cuenta con un sensor de fuerza y otro de flexión, los cuales son utilizados para hacer una retro alimentación de la posición en la cual se encuentra y la cantidad de fuerza que está sometiendo sobre determinado objeto.

El control del manipulador tipo gripper explicado anteriormente se puede observar en la **figura 62**.

**Figura 62.** Sistema usuario-gripper.



**Fuente:** Elaboración propia. .

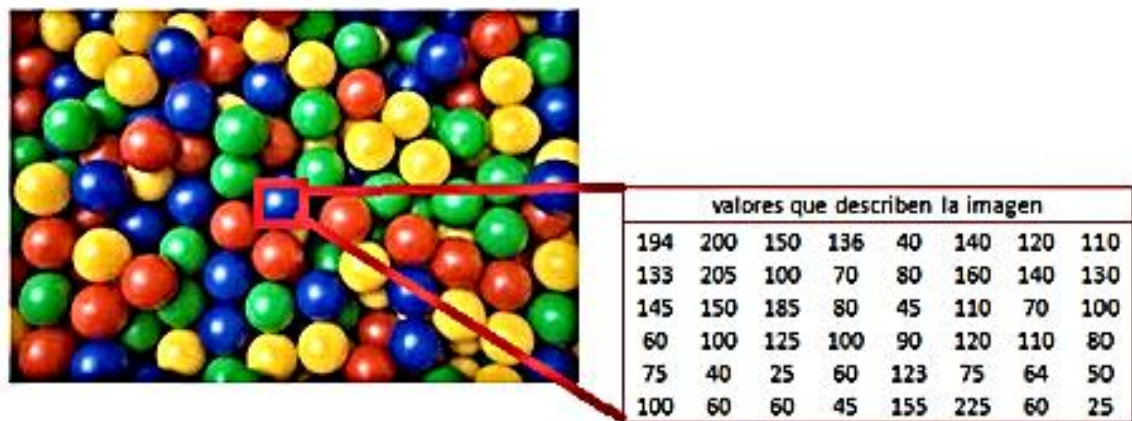
# Capítulo 4 Visión Artificial

La visión artificial es una rama de la inteligencia artificial, la cual tiene como objetivo modelar matemáticamente los procesos de percepción visual de los seres vivos, ya que permite obtener un análisis y un procesamiento de una imagen tomada del mundo tridimensional por medio de una cámara, en una representación de dos dimensiones, donde se encuentra no sólo sus propiedades geométricas como ubicación, tamaño y forma, sino que también otros componentes adicionales como el color, iluminación y textura.

En un sistema de visión artificial, la cámara arroja al computador una cuadrilla de números la cual describe lo que está viendo, sin hacer separaciones por relevancia, mientras que el cerebro humano interpreta la imagen dividiéndola en varios canales, y por medio de sistema de atención identifica partes relevantes y suprime las de menor importancia.

En la **figura 63** se muestra el ejemplo de una cuadrilla de números arrojada al computador por una cámara en un sistema de visión artificial, la cual contiene información donde se puede identificar propiedades como las mencionadas anteriormente. [57]

**Figura 63.** Matriz de números recibidos que describen una imagen tomada por una cámara.



**Fuente:** Elaboración propia.

Algunos de los objetivos de la visión artificial son: detectar, segmentar, localizar y reconocer determinados objetos en una imagen, registro de diferentes imágenes en una escena u objeto, mapeo de una escena con el fin de crear un modelo tridimensional, búsqueda de imágenes digitales por su contenido, entre otros. [58]

Con el fin de lograr los objetivos descritos anteriormente se utilizan algunos campos de la visión artificial, como lo son: el reconocimiento de patrones, el aprendizaje estadístico, el procesamiento de imágenes, etc. [58]

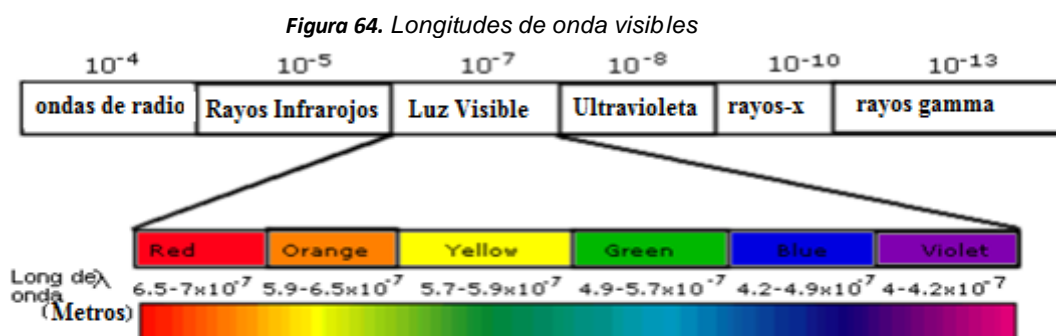
En el caso de este proyecto se utiliza el procesamiento de imágenes por computador. Conózcase procesamiento de imágenes, como el conjunto de técnicas aplicadas a una imagen digital con el objetivo de extraer cierta información de esta o simplemente mejorar la calidad de la misma. [59]

## 4.1 Conceptos generales

En este subíndice se exponen algunos de los términos esenciales a la hora de realizar el procesamiento de imágenes.

### 4.1.1 Espectro visible

Es conocido como espectro visible a la región de espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la pequeña región del espectro electromagnético cuyas ondas tienen una longitud desde 780 nanómetros de luz roja hasta 380 de luz violeta se le denomina luz visible. El ojo humano normalmente percibe longitudes de onda desde 400nm hasta 700nm. Estas longitudes se muestran en la **figura 64**. [60]



**Fuente:** Aranguren Zapata, A., & Vela Asin, T. (2012). *Sistema de seguimiento de objetos mediante procesamiento digital de imágenes aplicado al control de robots autónomos* (Doctoral dissertation, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas-UPC).

Para lograr distinguir los colores se necesitan tres elementos: la luz, ondas electromagnéticas; el observador, la persona que observa el fenómeno; y finalmente el objeto. [60]

Lo mencionado anteriormente tiene como finalidad mostrar las tres características que hacen distinguir un color de otro, estas son:

**Brillo:** noción monocromática (matizado de un objeto) de intensidad.

**Tono:** Color dominante percibido por el observador.

**Saturación:** El grado de saturación es inversamente proporcional a la cantidad de blanco del color que se percibe.

#### **4.1.2 Imagen digital**

Se refiere a una representación bidimensional de una imagen a través de una matriz, en donde cada uno de los números corresponde a la intensidad de cada pixel. Este tipo de imágenes se pueden obtener de diversas formas: por medio de escáneres y cámaras digitales; mediante programas informáticos; o por medio de un programa de renderización.

Las imágenes digitales se pueden modificar utilizando filtros, modificando el tamaño o quitando y agregando objetos.

#### **4.1.3 Espacios de color establecidos en el tratamiento de imágenes**

El color es generado por la intensidad de radiación electromagnética, evidenciado en diversas longitudes de onda discretas en la distribución de energía espectral. Las tres ondas espectrales de los conos soto-receptores de la retina del ojo humano son: roja, verde y azul. [61]

En el momento de realizar el procesamiento de imágenes hay una preocupación respecto a: la reflexión de la luz, el contraste, los cambios pequeños de color y el ruido de las imágenes. Por esto se han generado diversos espacios de color, algunos de estos se muestran a continuación. [61]

Al examinar diferencias en los cambios de color en los espacios de color permite determinar la utilidad de un espacio de color. El método más utilizado a la hora de medir la uniformidad de los colores es el de distancias euclidianas o distancias vectoriales. [61]

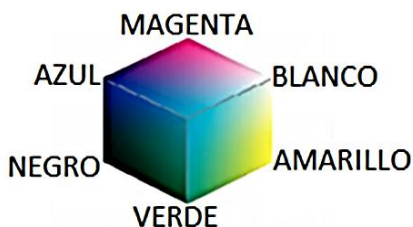
La distancia euclidiana en algunas ocasiones no es un buen discriminador de color, en los diversos espacios de color. Por ejemplo los espacios polares, en donde las distancias se operan mediante ángulos. En este caso es mejor opción utilizar distancias euclidianas o vectoriales. [61]

##### **4.1.3.1 Espacio RGB**

Este modelo se basa en un sistema de coordenadas cartesianas. En donde: los colores rojo, verde y azul (RGB) están ubicados en los tres vértices; El color negro, se

encuentra en el origen y el blanco en el vértice opuesto al origen. Esto se evidencia en la **figura 65**.

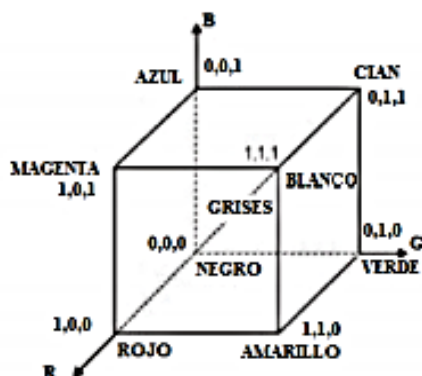
**Figura 65.** Cubo RGB



**Fuente:** Espino Gudiño, M. (2014). *Procesamiento morfológico, espacios color y quaternions, con biometría de la imagen y otras aplicaciones* (Doctoral dissertation).

Todos los colores se ordenan de tal manera que sea un cubo unitario en  $[0, 1]$ . Como se muestra en la **figura 66**.

**Figura 66.** Cubo unitario



**Fuente:** Espino Gudiño, M. (2014). *Procesamiento morfológico, espacios color y quaternions, con biometría de la imagen y otras aplicaciones* (Doctoral dissertation).

En este espacio los colores se suman para producir otros colores. Cada punto de color es representado por  $(R,G,B)$ , en donde se asigna un intervalo de 0 a 1. Por ejemplo para obtener el color magenta se suma el color rojo y el azul, de esta manera  $(1,0,1)$ .

#### 4.1.3.2 Espacio RGB normalizado

Por el tipo de definición se denota rgb normalizado, como se muestra en las ecuaciones 31, 32 y 33.



$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (31)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (32)$$

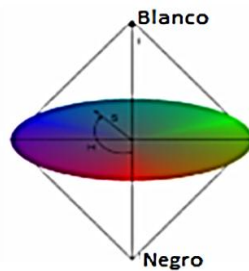
$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (33)$$

Este espacio muestra las siguientes características: es inestable y poco significativo cuando la intensidad es pequeña, aparte de que uno de sus componentes es reiterado ya que la suma del RGB es igual a 1; no se detecta pequeños cambios de intensidad, ya que los componentes rgb son dependientes de los tres canales RGB.

#### 4.1.3.3 Espacio HSI

Este espacio se representa como dos conos unidos, tal y como se muestra en la **figura 67**. Las tres componentes hacen referencia a: “H (Hue)”, indica el color; “S (saturación)”, muestra la pureza de un color; “I (intensidad)”, es la iluminación que posee el color, como se muestra en la **figura 67**.

**Figura 67.** Espacio HSI



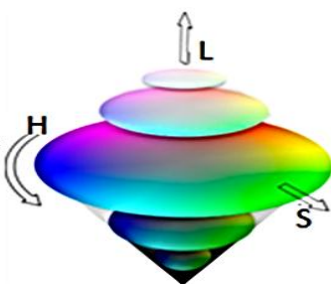
**Fuente:** Enríquez, I. J. G., Bonilla, M. N. I., & Cortés, J. M. R. (2009). Segmentación de rostro por color de la piel aplicado a detección de somnolencia en el conductor. In *Congreso Nacional de Ingeniería Electronica del Golfo CONAGOLFO* (pp. 67-72).

El espacio de color HSI separa la iluminación de la información del color, por ello el tono y la saturación permanecen constantes a las variaciones de la intensidad de la iluminación. Por tanto, permite un filtrado más robusto. [62]

#### 4.1.3.4 Espacio HSL

Este tipo de espacio de color utiliza un sistema de coordenadas cilíndricas. Como se muestra en la **figura 68** este espacio se encuentra definido en un doble cono. El valor del matiz va desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , el rango de saturación se encuentra definido entre cero y uno; de donde uno es el color más puro, y el rango de luminosidad también se encuentra en el rango de cero a uno; en el cual cero es negro y uno es blanco. [63]

**Figura 68.** Espacio HSL.



**Fuente:** modelo HSL para CSS. URL: <http://tzeek-design.com/blog/2007/08/03/modelo-hsl-para-css/>

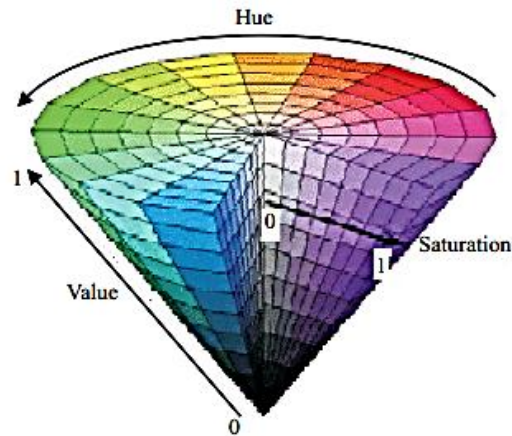
#### 4.1.3.5 Espacio HSV

El espacio HSV se basa en la forma en la que los humanos perciben e interpretan los colores, debido a que es una manera intuitiva para manejar el color.

El matiz “H” es lo que comúnmente se piensa como color, la saturación se identifica con la letra “S” y se denomina a la cantidad de blanco mezclado con color. Por tanto cuando hay una saturación en cero quiere decir que el color se encuentra dentro de una escala de grises. “V” hace referencia a la luminosidad. El espacio de color HSV se muestra en la **figura 69**. [64]

El modelo HXV utiliza tres términos: Luminosidad, se refiere a la cualidad de color más claro o más oscuro; Saturación, diferencia del color con respecto a un gris (*cuanto es la diferencia*); Matiz de color, se describe como el ángulo dentro de la rueda cromática o frecuencia dominante dentro del espectro.

**Figura 69.** Espacio HSV



**Fuente:** MANRIQUEZ TORRES, J. E. S. U. S. (2009). *MICROSCOPIA OPTICA Y ANALISIS DE IMAGENES EN LA CARACTERIZACION DEL TIEMPO CARGADO DE DISCOS DE PULIDO* (Doctoral dissertation).

## 4.2 Etapas de un proceso de visión artificial

Un sistema de visión artificial está compuesto por una serie de procesos, con los cuales se busca realizar un análisis de imágenes, para así poder lograr la interpretación de los elementos que la componen. [65]

Inicialmente se debe realizar la adquisición o captación de imagen, donde se busca realzar las características de los objetos, es una de las etapas más importantes ya que al realizar una buena adquisición facilita enormemente el cumplir con los objetivos de las siguientes fases. [65]

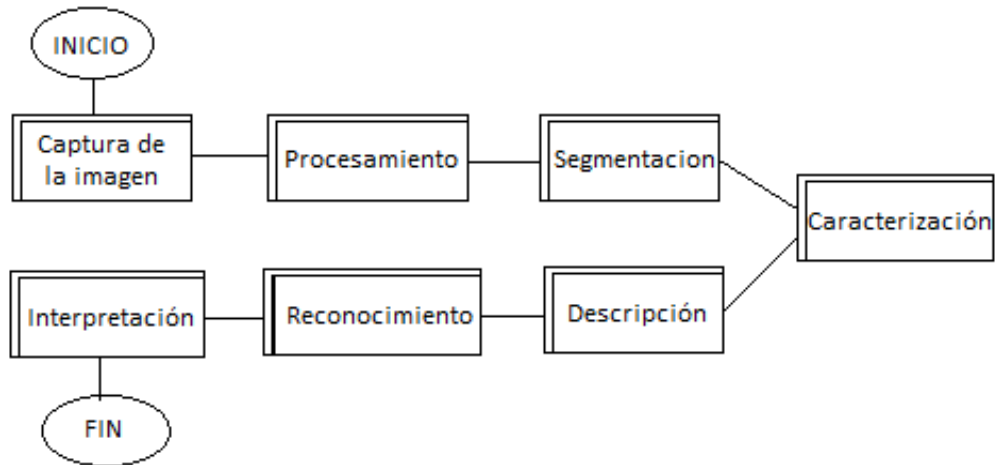
Seguidamente se realiza un pre procesamiento, donde se busca mejorar la imagen capturada mediante técnicas como lo son la supresión de ruido, realce de contraste, entre otras. Para luego realizar una segmentación donde se extrae las partes de interés, la imagen es dividida en dichas partes de acuerdo a un criterio de homogeneidad en ciertas características como pueden ser color, textura entre otras, dependiendo del objetivo de la aplicación se podrán marcar los objetos de interés. [65]

Luego se realiza el proceso de descripción donde dependiendo de la parametrización de cada objeto se extraen las características que lo diferencian de los demás, haciendo así un tipo de clasificación, para luego realizar un reconocimiento donde las técnicas más utilizadas son algoritmos genéticos, redes neuronales y métodos estadísticos. [65]

Finalmente se realiza la interpretación donde se realiza una acción si los objetos son reconocidos. [65]

En la **figura 70**, se muestra cada una de las etapas explicadas anteriormente, la secuencia que tiene y finalmente como llega a una acción dependiendo del objeto reconocido. [65]

**Figura 70.** Etapas del proceso de visión.



**Fuente:** Elaboración propia. .

El código implementado está en el **anexo 17** y el diagrama de flujo del programa en GUIDE® se muestra en el **anexo 18**. Mientras que el pseudocódigo se puede observar a continuación

### Inicio

```

Crear variables
Configuración cámara
Mientras (1)
    Si (botón_capturar=1)
        Captura imagen
        Realiza procesamiento
        Muestra resultados
        Si (circulo=1)
            Envía "4"
        Fin si
        Si (cuadrado=1)

```

```

                                Envía "5"
                        Fin si
                Fin si
        Si (botón_flex=1)
                Envía "1"
        Fin si
        Si (botón_opo1=1)
                Envía "2"
        Fin si
        Si (botón_opo2=1)
                Envía "3"
        Fin si
Fin Mientras
Fin

```

### 4.3 Aplicaciones de la visión artificial

Dentro de las aplicaciones de la visión artificial se encuentran las más importantes descritas a continuación:

**Lectura de datos** (OCR, OCV, códigos de barras): Mediante la digitalización de textos escritos, se busca reconocer caracteres o símbolos de un determinado alfabeto. [66]

**Invariancia de tamaño:** Mediante una rápida inspección se puede verificar que un producto este dentro de los límites de tamaño establecidos, asegurando así, que se encuentre en buen estado sin deformidades (control de calidad). [66]

**Biométrica:** consiste en la identificación de personas por medio de su huella digital, su rostro o sus retinas, es muy utilizado en cuanto a seguridad. [66]

**Video-vigilancia:** consiste en el seguimiento de personas en secuencia de imágenes, también la interpretación de las actividades que desarrollan. [66]

**Medicina:** por medio de imágenes tomadas al cuerpo humano, como lo son radiografías, resonancias magnéticas, tomografía entre otras, se puede realizar un diagnóstico de diferentes enfermedades. [66]

**Biología:** consiste en la identificación de diferentes propiedades de las células (color, forma, tamaño, etc.), también se puede realizar el conteo de células o microorganismos presentes en una muestra. [66]

**Orientación y posicionamiento de objetos:** como su nombre lo indica, consiste en verificar una orientación y/o posicionamiento de objetos en una línea de producción, generalmente para manipulación automatizada. [66]

**Conteo de productos:** realiza de forma automática un conteo rápido de productos tanto en movimiento como estáticos, generalmente es utilizado para procesos complejos y de alta velocidad, como lo es el empaquetado de productos. [66]

#### 4.4 Tipos de imágenes en Matlab®

Las herramientas de procesamiento de imágenes en matlab® se definen en cuatro tipos. Estos tipos de imagen determinan la forma en la cual se interpretan los elementos de la matriz de pixeles como valores de intensidad. [67]

El software matlab® trabaja con las siguientes clases de variables: double, uint8, uint16, uint32, int8, int16, int32, single, char y logical. Explicados en la **tabla 11**.

**Tabla 11.** Clases de imágenes en matlab®.

Tipo	Descripción
Double	Doble precisión, números en punto flotante que varían en un rango aproximado de -10308 a 10308 (8 bytes por elemento)
Uint8	Enteros de 8 bits en el rango de [0,255] (1 byte por elemento)
Uint16	Enteros de 16 bits en el rango de [0, 65535] (2 bytes por elemento)
Uint32	Enteros de 32 bits en el rango de [0, 4294967295] (4 bytes por elemento)
Int8	Enteros de 8 bits en el rango de [-128, 127] (1 byte por elemento)
Int16	Enteros de 16 bits en el rango de [-32768, 32767] (2 bytes por elemento)
Int32	Enteros de 32 bits en el rango de [-2147483648, 2147483647] (4 bytes por elemento)
Single	Número en punto flotante de precisión simple, con valores aproximadamente en el rango de -10 a 10 (4 bytes por elemento).
Char	Caracteres (2 byte por elemento)
Logical	Los valores son 0 ó 1 (1 byte por elemento)

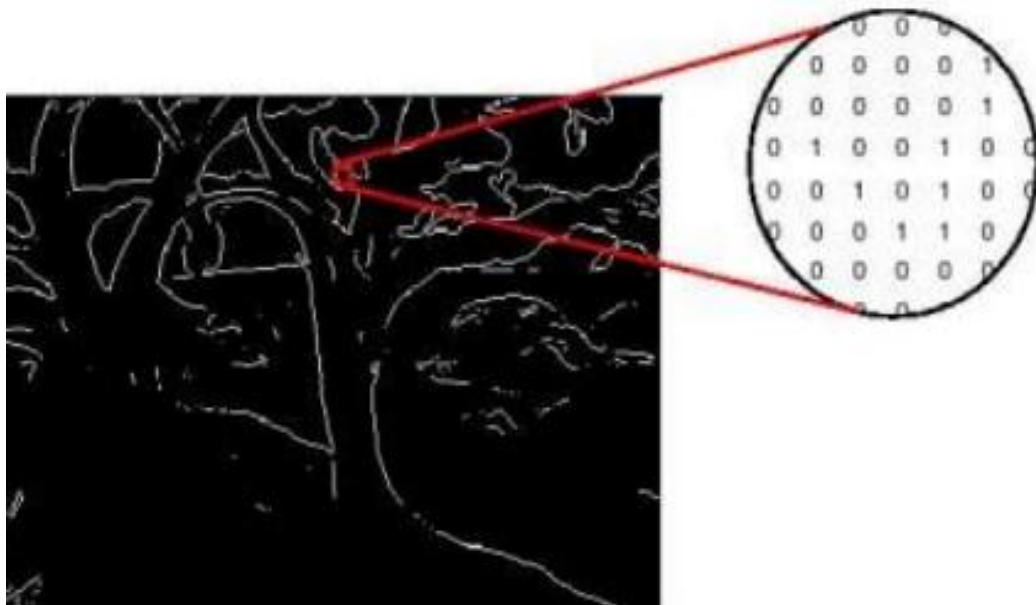
*Fuente: Elaboración propia. .*

##### 4.4.1 Imágenes Binarias

En las imágenes binarias cada pixel asume un valor discreto; estos valores son uno o cero (encendido o apagado). Este tipo de imágenes almacenan un arreglo de unos y ceros los cuales son representados en blanco y negro respectivamente.

En matlab® se representa como una matriz de tipo ***uint8 o doublé logical***. En la ***figura 71*** se muestra este tipo de imagen con vista de algunos de los valores de pixel.

**Figura 71.** Imagen binaria



**Fuente:** TINOCO DE LA LUZ, R. A. U. L. (2010). *SISTEMA DE RECONOCIMIENTO FACIAL POR MEDIO DE EIGENFACES Y REDES NEURONALES* (Doctoral dissertation).

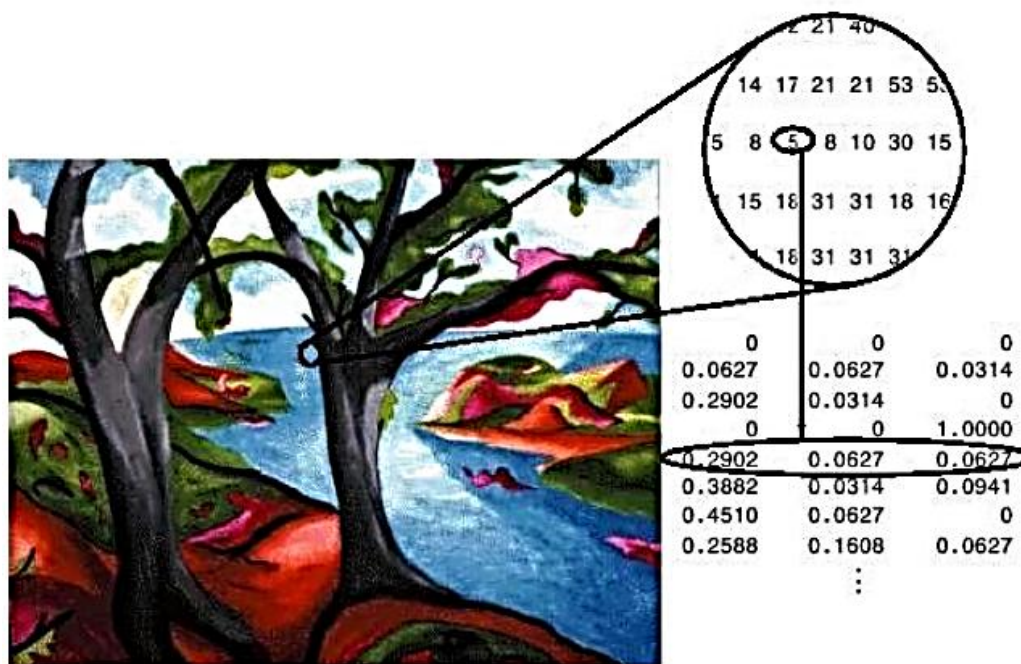
#### 4.4.2 Imágenes indexadas

Este tipo de imágenes consiste en una matriz de datos  $X$  y un mapa de color *mapa*. Estos datos pueden ser de clase *uint8*, *uint16* o *doublé*. El mapa de color es una matriz  $m \times 3$  que posee valores en un punto flotante dentro de un rango de cero a uno.

Cada columna detalla los componentes rojo, verde y azul de un solo color. Las imágenes indexadas utilizan mapeo directo de los valores de un pixel a los de un mapa de color. El color de cada pixel se halla usando el valor  $X$  como un índice dentro del mapa.

En la **figura 72** se muestra la estructura de la imagen indexada. Los pixeles en esta imagen son números enteros y apuntan a los valores de color almacenados en el mapa de color. [68]

**Figura 72.** Estructura de una imagen indexada.



**Fuente:** Villalta Moreno, W. M., & Fondevila Castro, J. J. (2012). Diseño e implementación de una herramienta demostrativa de aplicación de operadores morfológicos básicos con matlab®.

#### 4.4.3 Imágenes en escala de grises

Las imágenes de intensidad o escala de grises se componen de intensidades de grises, que va desde el negro variando gradualmente la intensidad de gris hasta llegar al blanco. Este tipo de imagen emplea 8 bits para la representación de cada color, por tanto, cuenta con 256 intensidades.

Este tipo de imágenes es representado en matlab® como una matriz de clase uint8, uint16 o double. Un ejemplo de esta clase de imagen se puede apreciar en la **figura 73**. [69]



**Figura 73.** Imagen de intensidad.



**Fuente:** Jorge Valverde blog. URL: [jc-info.blogspot.com](http://jc-info.blogspot.com)

#### 4.4.4 Imágenes truecolor

Una imagen RGB o truecolor, es almacenada en matlab® como una matriz  $m \times n \times 3$  que definen los componentes rojo, verde y azul de cada pixel. Este tipo de imagen es formada mediante la combinación de las intensidades almacenadas en cada plano de color. Una imagen de este tipo se evidencia en la **figura 74**. [70]

**Figura 74.** Imagen RGB o truecolor



**Fuente:** Guerrero echeverria, a. L. E. X. (2010). Diseño e implementacion de una herramienta didactica de software para el procesamiento digital basico de imagenes para los estudiantes de la facultad de ingenieria en electricidad y computacion (doctoral dissertation).

Las imágenes truecolor pueden ser del tipo ***doublé, uint8 o uint16***. En una matriz RGB los componentes de color toman el valor de cero o de uno.

Un pixel con componentes (0,0,0) es un color negro pero un pixel con valor (1,1,1) es blanco. Los tres componentes de cada color son guardados a través de la tercera dimensión de una matriz de datos. [76]

## **4.5 Filtrado de imágenes**

El filtrado digital de imágenes se fundamenta en la operación de convolución entre la imagen y la función de filtros; con el fin de mejorar la calidad de la imagen. [72]

### **4.5.1 Procesos de Filtrado**

Se refiere al conjunto de técnicas usadas durante el pre-procesamiento de imágenes con el objetivo de obtener a partir de una imagen ciertas características que permitan efectuar acciones sobre la misma. Algunos de los objetivos que se desean lograr a partir de la aplicación de filtros son: suavizar la imagen, reducir las variaciones de intensidad entre pixeles; eliminar ruido, consiste en eliminar los pixeles que poseen un nivel de intensidad muy diferente al deseado; bordes, destacar los bordes delimitados en la imagen.

Los filtros son considerados operaciones aplicadas a los pixeles de una imagen digital, con el fin de optimizarla y enfatizar cierta información. El proceso de filtrado se puede llevar a cabo en el dominio de la frecuencia y/o del espacio. [73]

#### **4.5.1.1 Operación de filtrado en el dominio de la frecuencia**

Este tipo de filtros procesan la imagen sobre el dominio de la frecuencia en la transformada de Fourier. Para ello se utiliza el teorema de la convolución, el cual consiste en aplicar la transformada de Fourier posteriormente multiplicar por el filtro seleccionado y finalmente utilizar la transformada inversa de Fourier. [74]

Existen tres tipos de filtros que se pueden aplicar, como lo son: filtro pasa bajo, filtro pasa alto y filtro pasa banda. [74]

En el filtro paso bajo se atenúan las frecuencias altas y se mantienen las bajas. Por tanto el resultado en el dominio espacial es similar a suavizar la imagen (eliminar los pixeles con alta intensidad); el filtro paso alto realiza el proceso contrario. Por lo tanto, atenúa las frecuencias bajas y mantiene las altas. Con este filtro se puede mejorar la detección de bordes en el dominio espacial; en cuanto al filtro paso banda, atenúa las altas y bajas frecuencias manteniendo un rango determinado. [74]

#### 4.5.1.2 Operación de filtrado en el dominio espacial

En este tipo de filtrado las operaciones realizadas a la imagen se realizan directamente sobre los píxeles de la imagen. Este proceso se realiza en cada uno de los puntos próximos al píxel objetivo de la imagen que se desea filtrar, con el fin de obtener información útil y dependiente al aplicar algún filtro. Los filtros de este tipo de dominio se clasifican en lineales y no lineales. [75]

#### 4.6 Ventajas de la visión artificial sobre la visión humana

El sentido de la vista provee el 75% de la información que recibe el ser humano en el cerebro. Por tanto el sistema de visión humano no es totalmente seguro, debido a que en algunas circunstancias puede ocasionar ilusiones que hacen que el ser humano vea cosas que no son. Teniendo en cuenta algunos avances científicos los sistemas de visión artificial superan el ojo humano en algunos casos como se evidencia en la **tabla 12**. [76]

**Tabla 12.** Ventajas de la visión artificial sobre la visión humana.

	Visión humana	Visión artificial
ARGUMENTOS	Capta un corto rango de frecuencias y amplitudes, conocido como " <b>rango de luz visible</b> ". [76]	Logra captar el rango de luz visible, ondas de radio, infrarrojos, rayos X, rayos cósmicos, entre otros. [76]
	Descifra entre 10 o 20 niveles de gris. [76]	Posee mayor definición. [76]
	Tiene una velocidad de respuesta de 0.06 segundos. [76]	La velocidad de respuesta es de 0.00001 segundos. [76]
	Cuenta con poca precisión apoyándose en instrumentos de medición. [76]	Tiene alta precisión de medición dependiendo de la resolución espacial de los componentes del sistema. [76]
	No es tan consistente debido a la fatiga y a las distracciones. [76]	Mantiene el nivel de rendimiento a lo largo de su vida útil. [76]

**Fuente:** Elaboración propia.

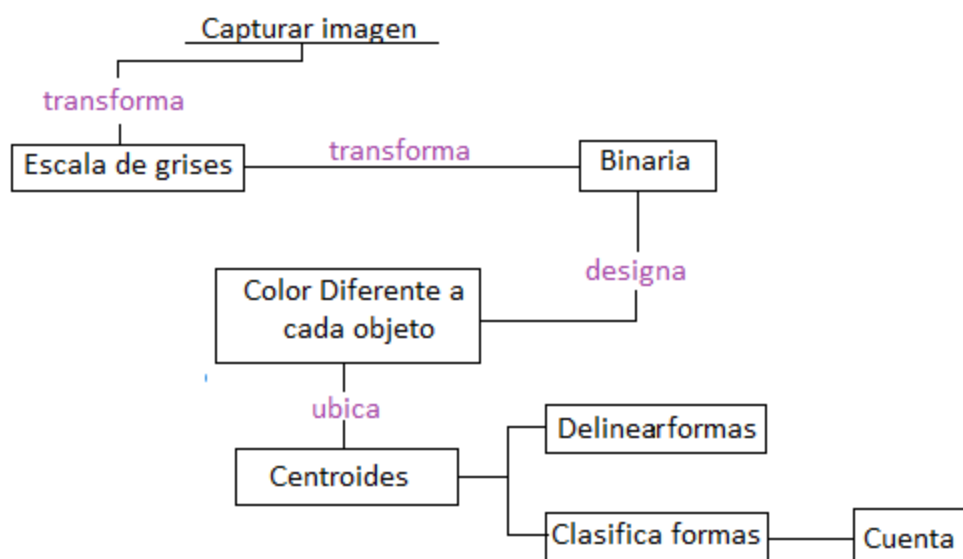
## Capítulo 5 Integración Pruebas

El prototipo manipulador tipo gripper posee un software de manipulación (*interfaz gráfica en matlab®*), mediante el cual se puede reconocer el tipo de objeto a sujetar; en este caso como se planteó desde un principio posee la habilidad de agarrar cubos y esferas. Además de esto el software de manipulación cuenta con 3 botones que reproducen los movimientos de la mano humana.

### 5.1 Detector de formas

En la **figura 75** se evidencia el procedimiento seguido para poder reconocer el tipo de objeto que debe sujetar el gripper.

**Figura 75.**Diagrama reconocimiento de formas.

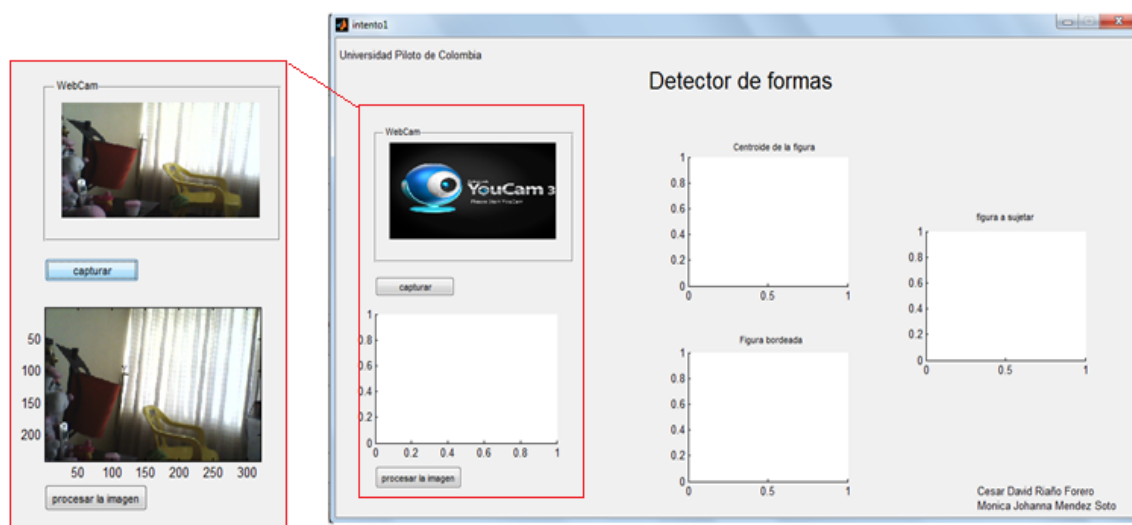


**Fuente:** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el diagrama anterior, se procede a mostrar cada uno de los pasos que se debieron realizar para poder reconocer los tipos de objetos.

Inicialmente se realiza captura de la imagen para posteriormente ser mostrada en pantalla, como se puede evidenciar en la **Figura 76**.

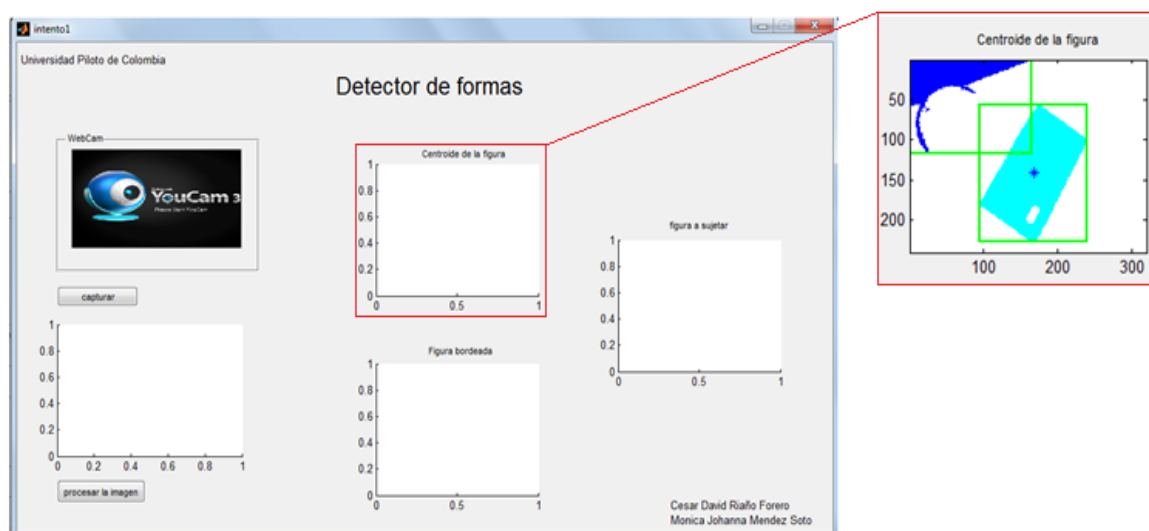
**Figura 76. Captura de objetos**



*Fuente: Elaboración propia. .*

Después de tener la captura almacenada en una variable, se hace la transformación a escala de grises para luego convertirla en una imagen binaria y de esta manera resaltar en blanco los objetos a detectar. En el momento en el cual se tiene la imagen en binario se asigna a cada objeto encontrado un color diferente. Como ya se reconoció la forma del objeto se puede asignar el centroide y bordear con un rectángulo que limita el tamaño de cada objeto. Esto se puede evidenciar en la **figura 77**.

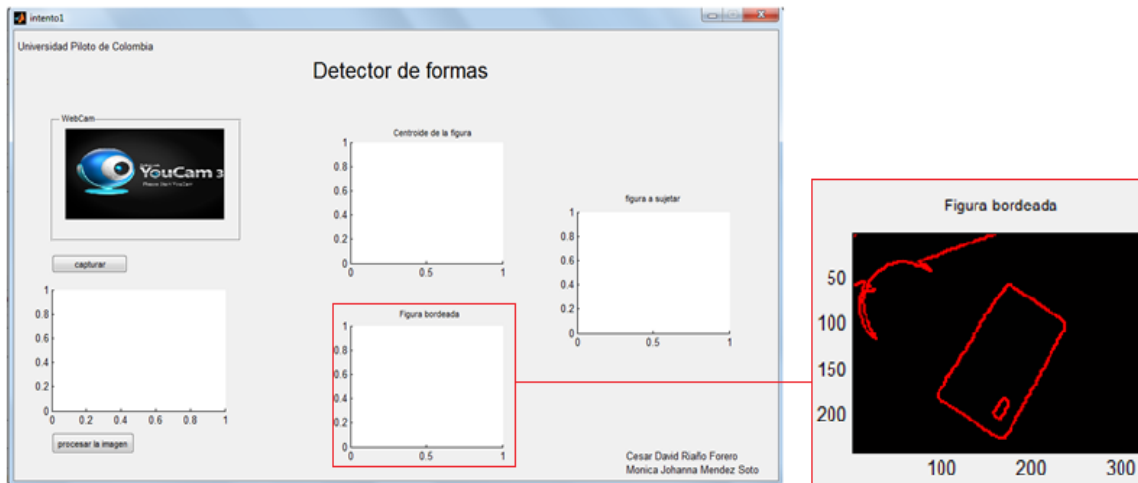
**Figura 77. Objeto dentro del recuadro y centroide del mismo.**



*Fuente: Elaboración propia. .*

Tomando como base las características de la imagen (*área, perímetro y centroide*), obtenidas por medio del comando **regionprops**. Se puede delimitar el tamaño de la figura como se muestra en la **figura 78**. En donde el rectángulo es bordeado perfectamente.

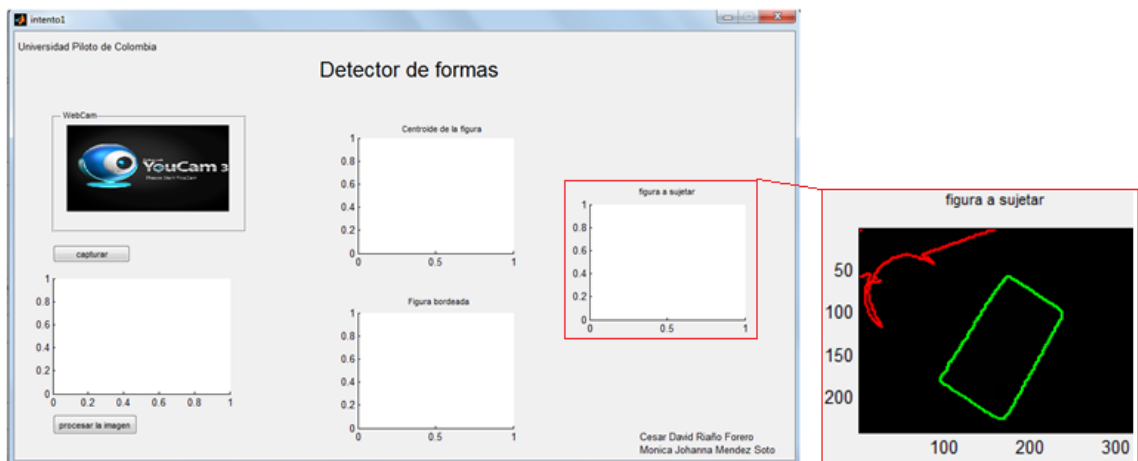
**Figura 78.** Delineamiento de los objetos y contorno.



*Fuente: Elaboración propia. .*

Ya teniendo delimitado cada objeto de acuerdo a su forma; se procede a mostrar de un color diferente dependiendo del tipo de objeto reconocido. En el caso de los círculos son bordeados con color rojo y en el caso de los rectángulos se bordean con el color verde, como se muestra en la **figura 79**.

**Figura 79.** Objeto reconocido y bordeado.



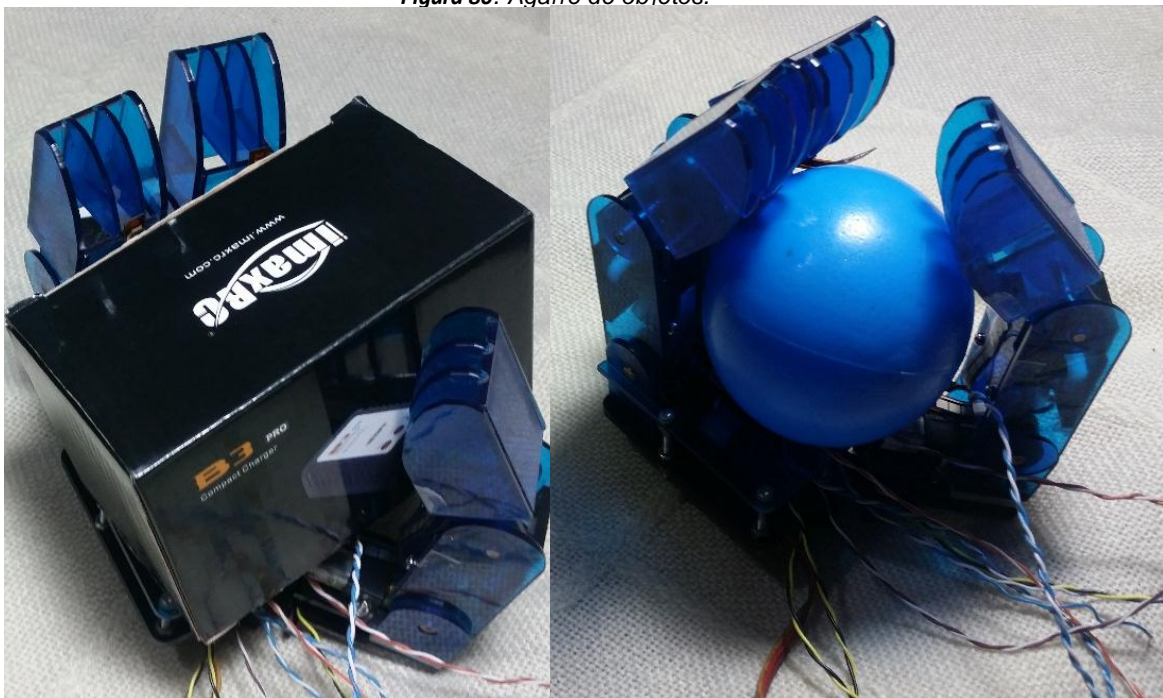
*Fuente: Elaboración propia. .*

Cabe aclarar que la identificación de varios objetos a la vez fue realizada pensando a futuro, ya que la mano robótica por el momento no tiene la habilidad de ir a seleccionar que objeto tomar por sí sola. Por tal razón el programa solo va a ser utilizado para identificar un objeto a la vez, y luego dicho objeto será puesto para que lo tome con una presión específica.

Hay que tener en cuenta que la tarjeta recibe por comunicación serial con matlab® que objeto debe agarrar el gripper (mano robótica), para de esta manera realizar el movimiento de oposición y poder coger el objeto con una presión ya programada. Dicha presión puede ser mínima, de tal manera que pueda tomar un huevo sin que se rompa o lo bastante alta para agarrar objetos compuestos por materiales más robustos, los cuales no tienen el riesgo de sufrir una deformación fácilmente.

En la **figura 80-a** se puede observar la forma de sujetar una esfera y en la **figura 80-b** se muestra la forma de sujetar un objeto cúbico. Cada uno de los objetos es sujetado de acuerdo a la información suministrada por matlab® al sistema embebido.

**Figura 80.** Agarre de objetos.



**a.** Objeto cubico

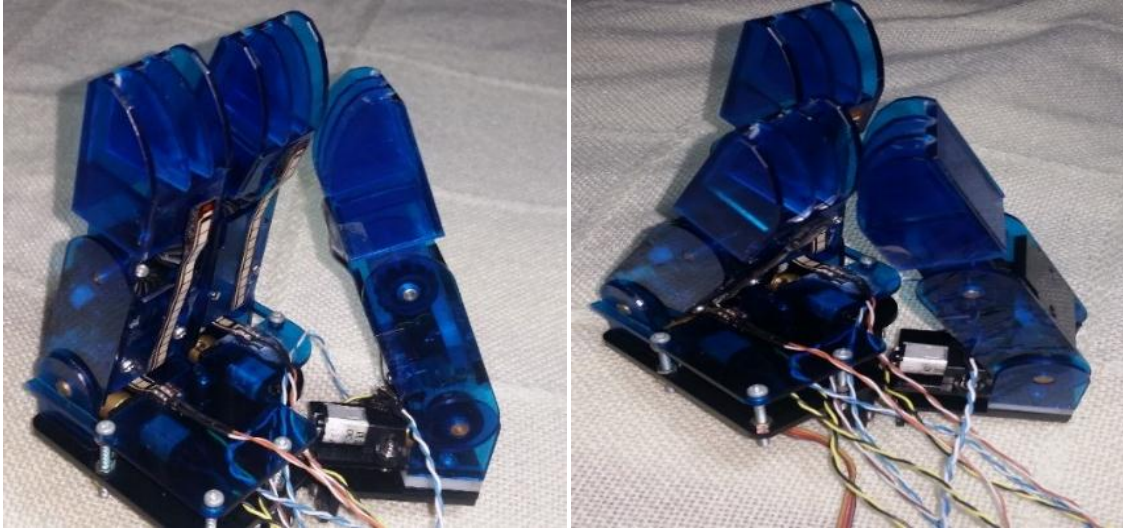
**b.** Objeto esférico

**Fuente:** Elaboración propia. .

## 5.2 Reproducción de los movimientos realizados por la mano humana

El objetivo principal del gripper es realizar los tres movimientos producidos por la mano humana por esta razón en la **figura 81 a- b** se puede apreciar el movimiento de oposición con cada uno de los dedos. Este movimiento es el más utilizado a la hora de agarrar cualquier tipo de objeto.

**Figura 81.** Movimiento de oposición.



a. Oposicion con el dedo indice

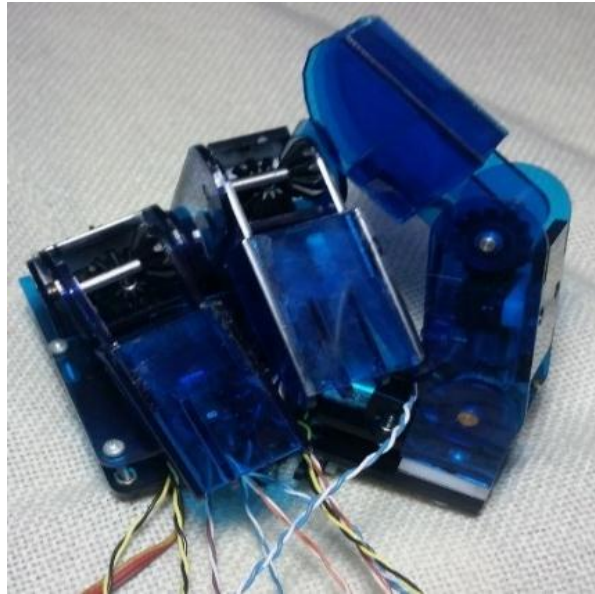
b. Oposicion con el dedo medio

**Fuente:** Elaboración propia.

Otro de los movimientos indispensables a la hora de sujetar objetos es el de flexión; ya que se necesita recoger la mano para poder agarrar de una manera firme determinado objeto. Este movimiento se puede observar en la **figura 82.**



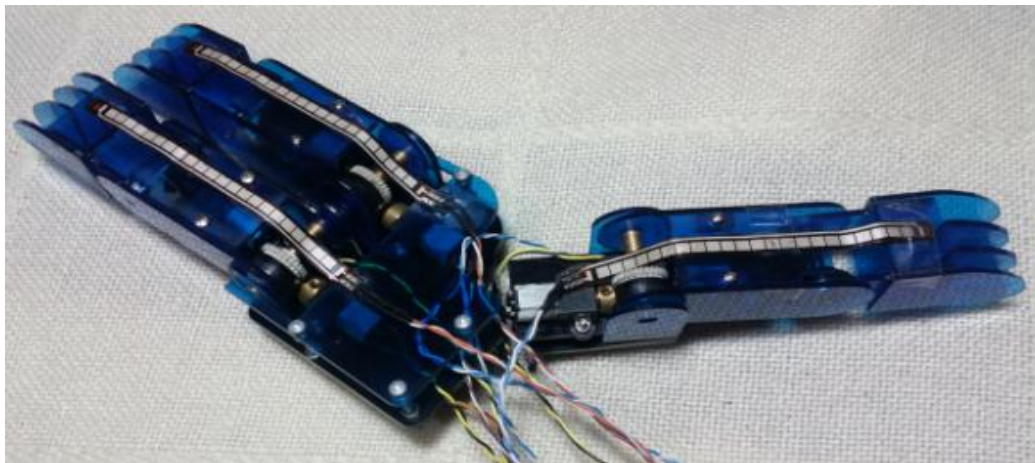
**Figura 82.** Movimiento de flexión.



**Fuente:** Elaboración propia. .

Finalmente, el movimiento de extensión el cual se basa en abrir la mano hasta su punto máximo, como se muestra en la **figura 83**.

**Figura 83.** Movimiento de extensión.



**Fuente:** Elaboración propia. .

# Capítulo 6 Conclusiones y trabajos futuros

## 6.1. Conclusiones

La revisión de los antecedentes bibliográficos correspondiente a los desarrollos de prótesis robóticas y grippers industriales permitió realizar el diseño mecánico y electrónico del prototipo manipulador tipo gripper con la posibilidad de oponer uno de sus dedos y poseer una mejor precisión a la hora de sujetar elementos.

Se realizó un prototipo de mano robótica el cual posee dos dedos con dos grados de libertad y un dedo de tres grados de libertad, cada uno de los dedos está dotado con dos motores DC; uno para el movimiento de la falange distal y el otro para el movimiento de la falange proximal. El dedo pulgar posee un servo-motor adicional que permitió realizar el movimiento de oposición con los otros dos dedos.

Se logró que el manipulador tipo gripper realice los movimientos de flexión, extensión y oposición, por medio de los datos obtenidos por los sensores de flexión. En cuanto a la sujeción de objetos esféricos y cúbicos se realiza mediante los datos obtenidos en el procesamiento de imágenes y la retroalimentación de los sensores de flexión y presión.

Se diseñó una interfaz hardware/software que permite la conexión entre la interfaz gráfica y el prototipo manipulador tipo gripper, esto con el fin de obtener una retroalimentación sensorial y enviar las órdenes para realizar posturas de sujeción.

En cuanto al procesamiento de imágenes se obtuvieron problemas en la iluminación del entorno, ya que cuando se cambiaba la intensidad de la luz se alteraba los valores RGB de la imagen capturada; por tanto no realizaba correctamente la identificación de patrones.

## 6.2. Trabajos futuros

Se desea implementar este prototipo a un brazo robótico con el fin de poder seleccionar entre múltiples objetos uno específico y así mismo poder transferir este elemento de un lugar a otro sin problema alguno.

# Anexo 1. Marco Legal

La organización internacional de estándares (ISO), posee diferentes normas para la incursión de los robots manipuladores. Estas normas se pueden evidenciar en la **tabla 13**. [43]

**Tabla 13. Normas ISO para robots manipuladores.**

<b>NORMA</b>	<b>TITULO</b>
UNE EN ISO 8373:1998	Vocabulario.
EN ISO 9787:1999	Sistema de coordenadas y movimientos.
EN ISO 9946:1999	Presentación de las características.
UNE EN ISO 9283:1998	Criterios de análisis de presentaciones y métodos de ensayo relacionados.
UNE EN ISO 10218:2006	Seguridad.
UNE EN ISO 15187:2003	Interfaces gráficas de usuario para la programación y funcionamiento de robots (GUI-R).
UNE EN ISO 9409-1:1996	Interfaces mecánicas parte 1: interfaces por placa.
UNE EN ISO 9409-2:2003	Interfaces mecánicas parte 2: ejes.
EN ISO 11593:1996	Sistemas de intercambio automático de efector, vocabulario y presentación de características.
UNE EN ISO 14539:2000	Transporte de objetos con dispositivos de agarre tipo empuñadura. Vocabulario y presentación de características.

**Fuente:** Elaboración propia. .

## UNE EN ISO 8373:1998. Vocabulario

En esta norma se definen los términos relevantes de los robots manipuladores industriales. Estas definiciones se dividen en cinco grupos.

Términos generales (manipulador, robot, etc.)

Estructura mecánica (eslabón, articulación, configuración, etc.)

Geometría y cinemática (modelo geométrico, grado de libertad, etc.)

Programación y control (programación de aprendizaje, control de trayectoria continua, etc.)

Prestaciones (carga, velocidad, etc.)

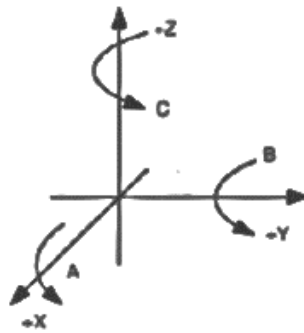
## EN ISO 9787:1999. Sistema de coordenadas y nomenclatura de movimientos

Los sistemas de coordenadas corresponden a sistemas ortogonales que se encuentran de acuerdo a la regla de la mano derecha.

Los giros en torno a los ejes X, Y y Z se denominan respectivamente A, B y C, y se consideran positivos de acuerdo a la regla del sacacorchos. Esto se muestra en la **figura 84**.

El sistema de coordenadas se denota como  $O_0, X_0, Y_0, Z_0$ . De donde: el origen es  $O_0$ ; el eje  $Z_0$ , debe encontrarse en dirección a la gravedad pero con sentido contrario; el eje  $X_0$ , se situara en la dirección que convenga al usuario y el eje  $Y_0$ , formara una terna ortogonal con los dos ejes anteriores.

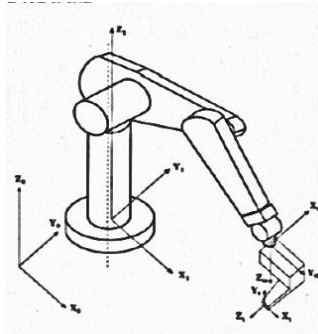
**Figura 84.** Sistema de coordenadas.



**Fuente:** Normativa sobre robots industriales. (s.f.). Obtenido de [http://www.mayr.ua.es/docs\\_mayr10/rob/Normativa%20sobre%20robots%20industriales.pdf](http://www.mayr.ua.es/docs_mayr10/rob/Normativa%20sobre%20robots%20industriales.pdf)

El sistema de coordenadas de la base se denota como  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$ . De donde: el origen es  $O_0$ ; el eje  $Z_1$ , debe encontrarse en dirección a la estructura mecánica, perpendicular a la superficie de fijación de la base del robot y alejándose de esta; para definir el eje  $X_1$ , se define en primer lugar el punto central del espacio de trabajo  $C_w$ . este se define como la posición del punto de referencia de la muñeca; en el momento que se identifica este eje se puede situar  $X_1$  desde el origen  $O_1$  hacia la proyección de  $C_w$ . esto se evidencia en la **figura 85**.

**Figura 85 . Sistema de coordenadas 2.**



**Fuente:** Normativa sobre robots industriales. (s.f.). Obtenido de [http://www.mayr.ua.es/docs\\_mayr10/rob/Normativa%20sobre%20robots%20industriales.pdf](http://www.mayr.ua.es/docs_mayr10/rob/Normativa%20sobre%20robots%20industriales.pdf)

En esta norma se establece que los ejes del robot se debe numerar indicando que el eje 1 es el más cercano a la superficie del montaje del robot, el eje 2 el siguiente y a así sucesivamente hasta llegar al eje m que es el unido a la interface mecánica.

### **EN ISO. Presentación de las características**

En esta norma se establece la forma en la cual los fabricantes de los robots deben presentar las características de estos. Esto contribuye a facilitar la comparación y selección de un robot para una aplicación específica.

### **UNE EN ISO 9283:1998. Criterios de análisis de presentaciones y métodos de ensayo relacionados**

En esta norma se establece la forma en la que los fabricantes deben medir determinadas prestaciones relacionadas con el movimiento y posicionamiento. Se definen la localización de los puntos y trayectorias usadas para cuantificar las prestaciones del robot. En esta norma se consideran diecinueve características que se agrupan en cuatro tipos: características de posición, cuantifican las diferencias entre las posiciones programadas y las alcanzadas; características de trayectoria, evalúa la calidad de la trayectoria seguida y la ideal; características de velocidad, cualifica la velocidad programada con respecto a la velocidad alcanzada; y otras características, enfocadas al tiempo de operación.

### **ISO 10218-1:2006. Requisitos de seguridad**

Esta norma se divide en dos partes: en la primera parte se abordan los requisitos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar las fases de diseño y construcción del robot; en la segunda parte se establecen las medidas para aumentar la seguridad en las fases de integración del robot, pruebas de funcionamiento, operación, mantenimiento y reparación.

## Anexo 2. Código validación del modelo cinemático del gripper

```
function dedo_indice
%hold on

for i=0:0.1:pi
Long_sistemas = 10;
color_dedo_ind = [0,0,0];
grosor_eslabones = 5;
axis([-120 120 0 120 0 120]);
grid on
A0bd0=[1,0,0,5;0,0,1,0;0,-1,0,0;0,0,0,1];    %matriz
coordenadas iniciales

xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')
view(30,30)    %orientacion

Abd0bd1=denavit(-i,0,60,0);                    %funcion denavit
de 0 a 1
Abd1bd2=denavit(-i/2,0,40,0);                  %funcion
denavit de 1 a 2

A0bd1 = A0bd0*Abd0bd1;                        %matriz del
eslabon 1 de 0 a 1
A0bd2 = A0bd1*Abd1bd2;                        %matriz del
eslabon 2 de 0 a 2

% % Calcula puntos absolutos
pbd0_desde_0 = A0bd0(1:4,4);
pbda_desde_0 = A0bd1(1:4,4);
pbd1_desde_0 = A0bd2(1:4,4);

% dibujar eslabones
dibujar_linea_pp(pbd0_desde_0,pbda_desde_0,[1,0,0],
grosor_eslabones);
dibujar_linea_pp(pbda_desde_0,pbd1_desde_0,[0,0,0],
grosor_eslabones);
```

```

%dibujo sistema de coordenadas
dibujar_sistema_de_referencia_bien(A0bd0,Long_sistemas,'{
0}'); % Sistema del pecho
dibujar_sistema_de_referencia_bien(A0bd1,Long_sistemas,'{
1}'); % Sistema del pecho
dibujar_sistema_de_referencia_bien(A0bd2,Long_sistemas,'{
2}'); % Sistema del pecho

pause(.5)
clf

end

end

function dibujar_linea_pp(p1,p2, color, grosor)

% Dibuja los sistemas coordenados
line([p1(1), p2(1)], [p1(2), p2(2)], [p1(3), p2(3)],
'Color', color , 'LineWidth', grosor);

function
dibujar_sistema_de_referencia_bien(A,L,subindice)

% Puntos referidos al sistema de referencia A
pA0 = [0;0;0;1];
pA1 = [L;0;0;1];
pA2 = [0;L;0;1];
pA3 = [0;0;L;1];

% Puntos referidos al sistema absoluto
pabs0 = A * pA0;
pabs1 = A * pA1;
pabs2 = A * pA2;
pabs3 = A * pA3;
% Dibuja los sistemas coordenados
line([pabs0(1), pabs1(1)], [pabs0(2), pabs1(2)],
[pabs0(3), pabs1(3)], 'Color', [1,0,0] , 'LineWidth',2.5);
line([pabs0(1), pabs2(1)], [pabs0(2), pabs2(2)],
[pabs0(3), pabs2(3)], 'Color', [0,1,0] , 'LineWidth',2.5);
line([pabs0(1), pabs3(1)], [pabs0(2), pabs3(2)],
[pabs0(3), pabs3(3)], 'Color', [0,0,1] , 'LineWidth',2.5);

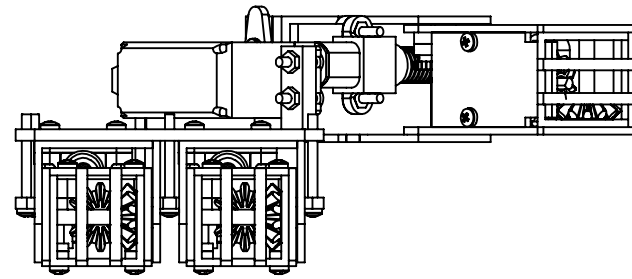
text( pabs1(1) , pabs1(2),pabs1(3),['X_',subindice] );

```

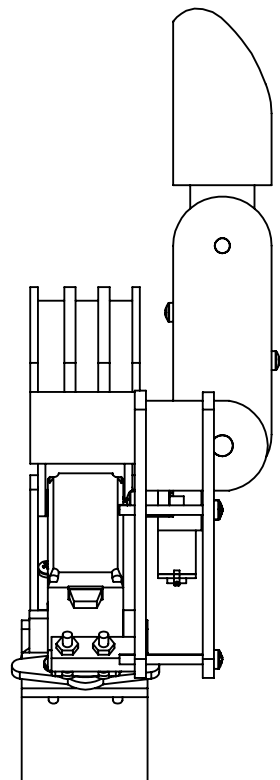
```
text( pabs2(1) , pabs2(2),pabs2(3),['Y_',subindice] );  
text( pabs3(1) , pabs3(2),pabs3(3),['Z_',subindice] );
```



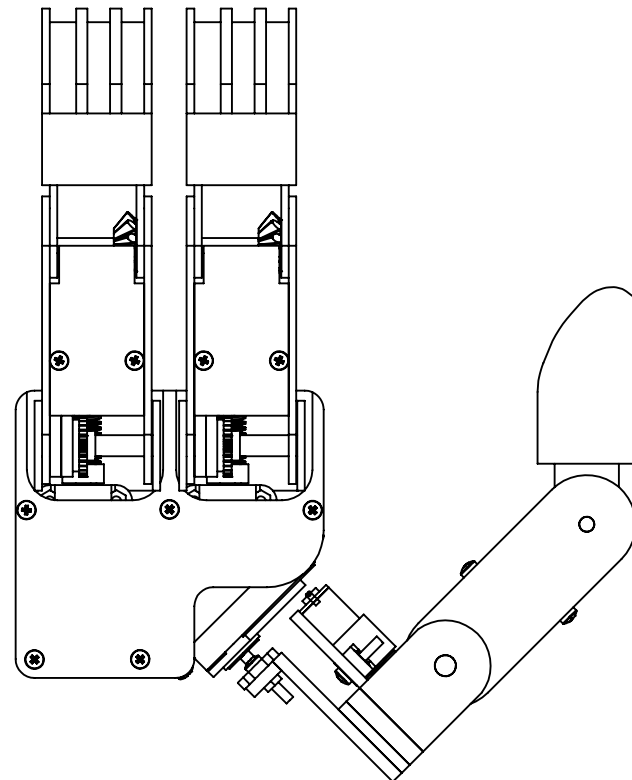
## **Anexo 3. Planos Gripper**



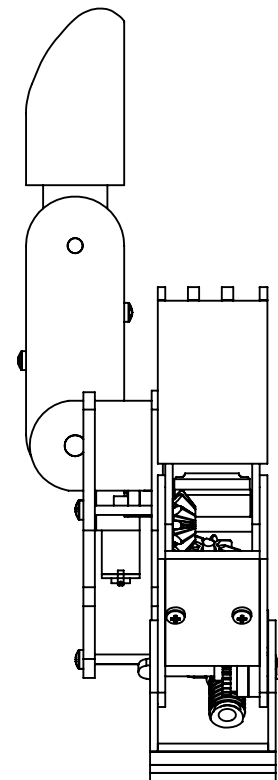
PLANTA



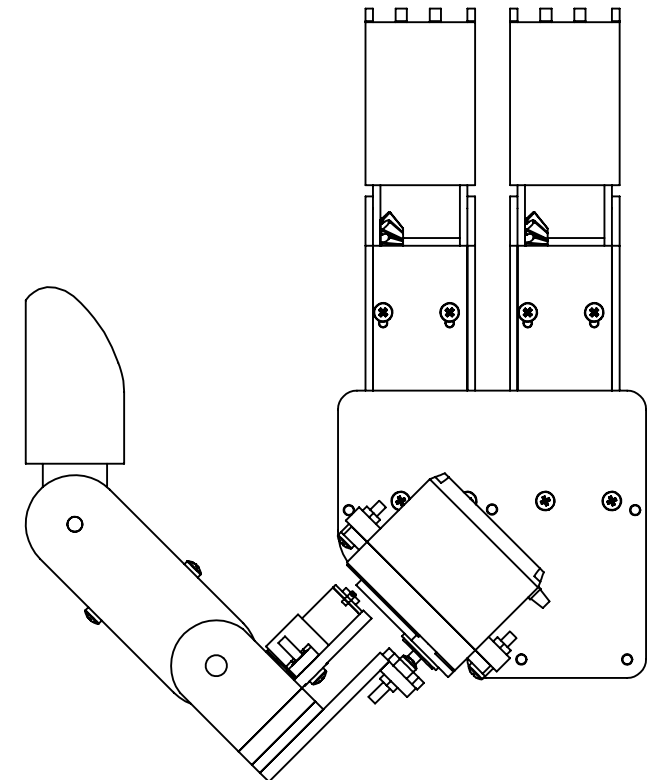
PERFIL IZQUIERDO



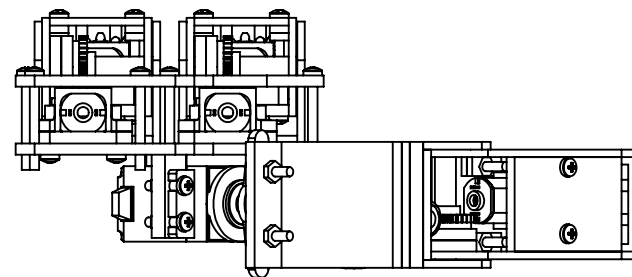
ALZADO



PERFIL DERECHO



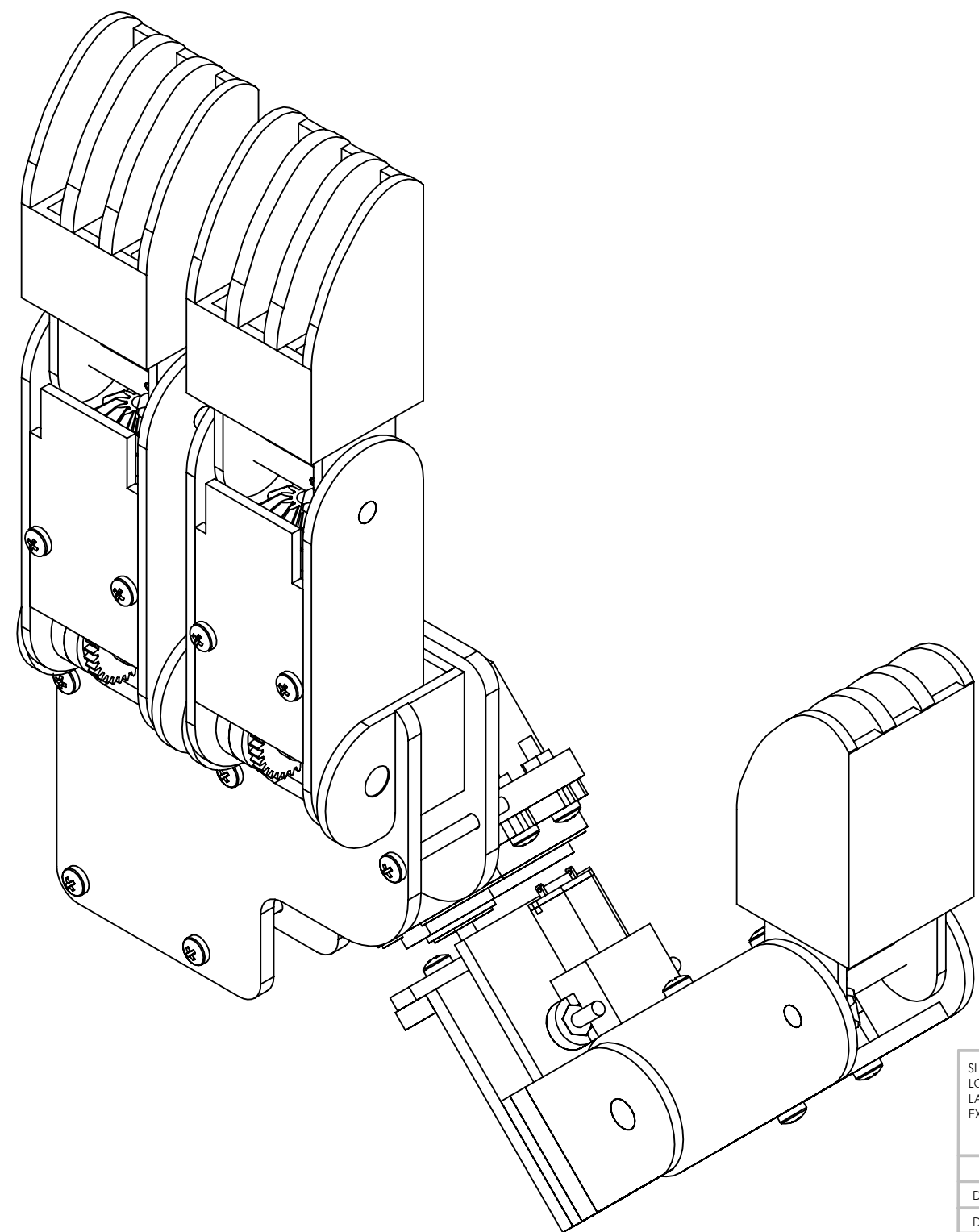
ALZADO POSTERIOR



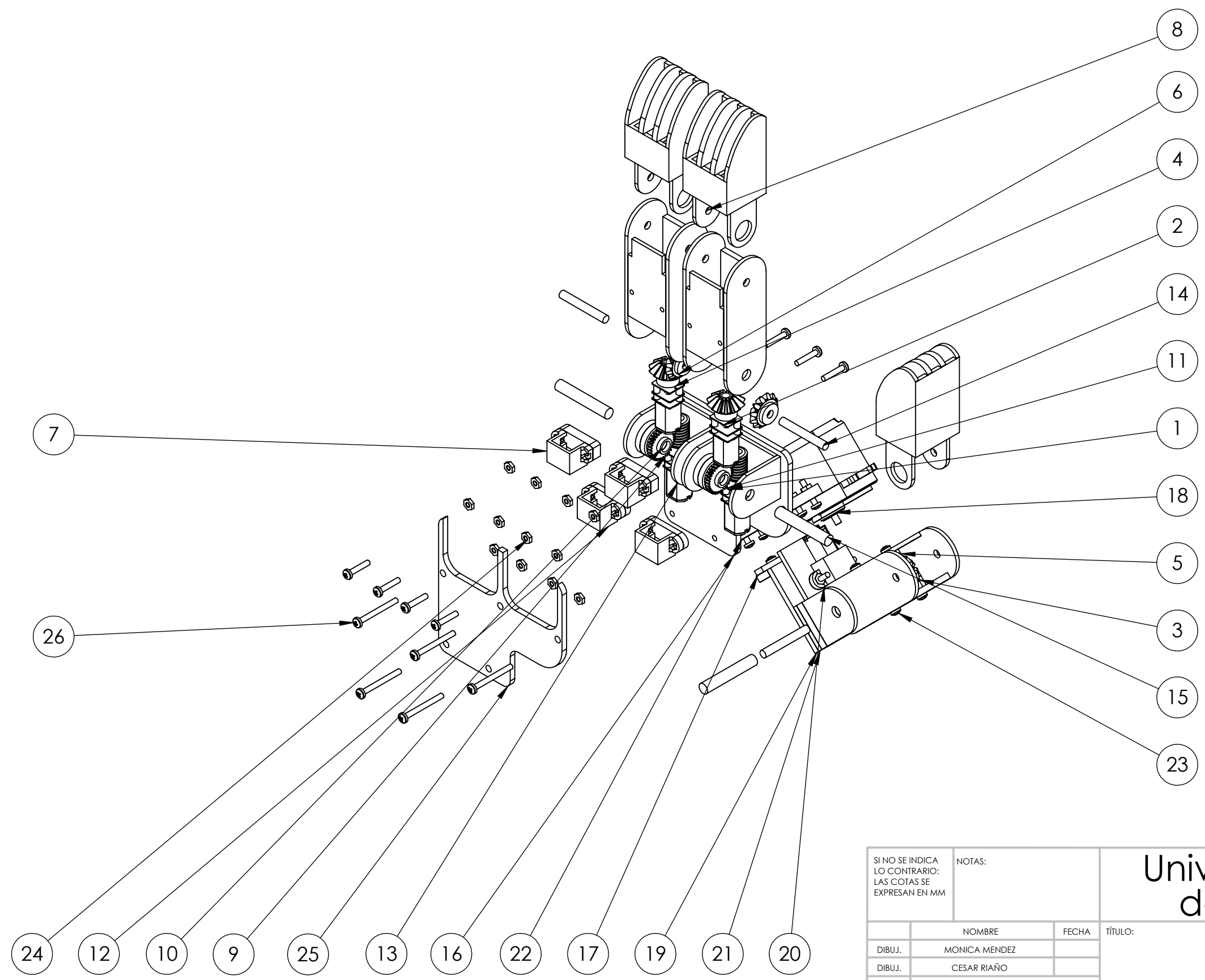
PLANTA INFERIOR

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
	NOMBRE		FECHA	TÍTULO:  Gripper	
DIBUJ.	MONICA MENDEZ				
DIBUJ.	CESAR RIAÑO				
APROB.	RUBEN HERNANDEZ				
CAID.					
	MATERIAL:			N.º DE DIBUJO	
				VISTAS DEL MODELO	
	PESO: --- g			ESCALA:1:2	HOJA 1
				A3	

# PERSPECTIVA ISOMETRICA

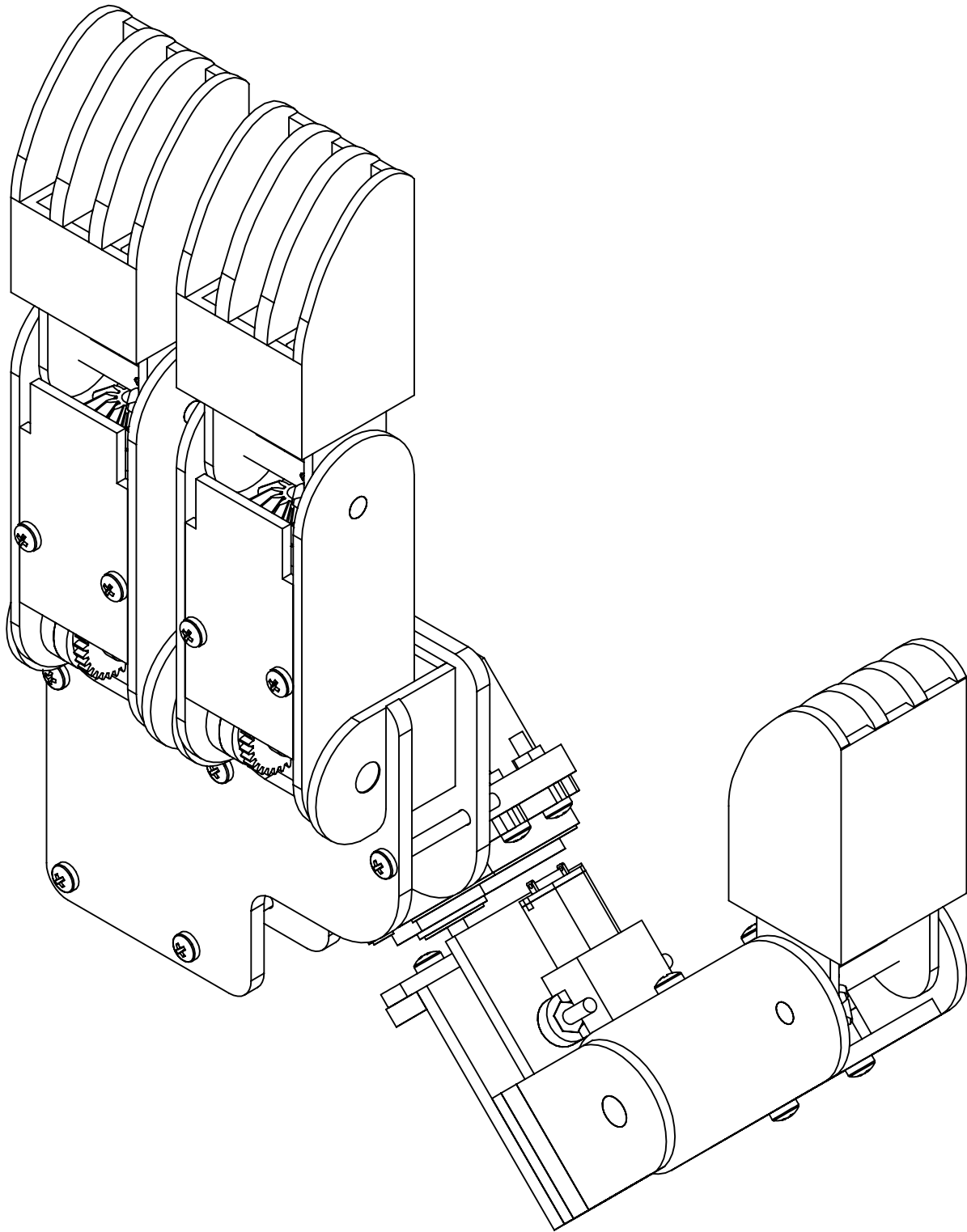


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:  Gripper		
DIBUJ.	MONICA MENDEZ				
DIBUJ.	CESAR RIAÑO				
APROB.	RUBEN HERNANDEZ				
CALID.			N.º DE DIBUJO		A3
MATERIAL:		VISTA-PERSPECTIVA			
PESO:    — g		ESCALA: 1:1		HOJA 2	

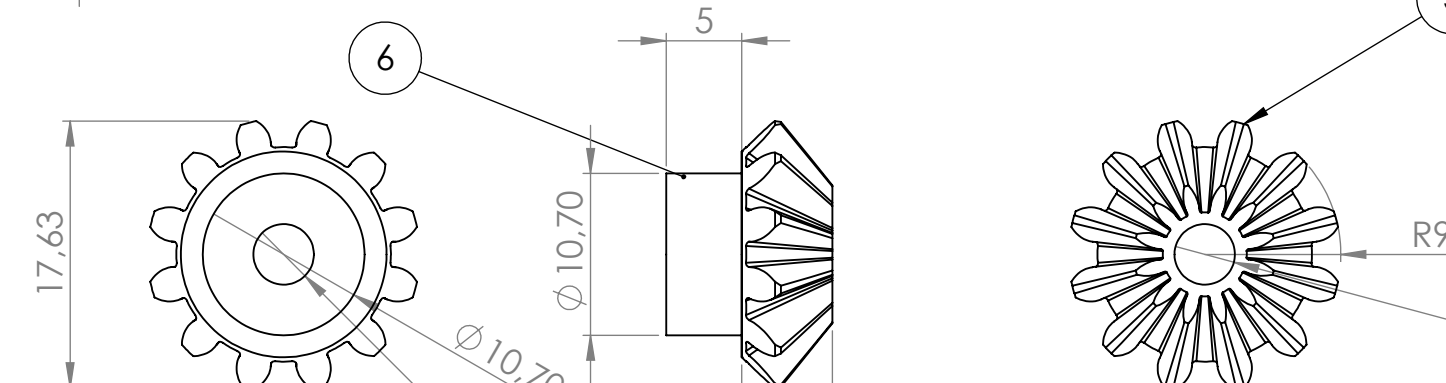
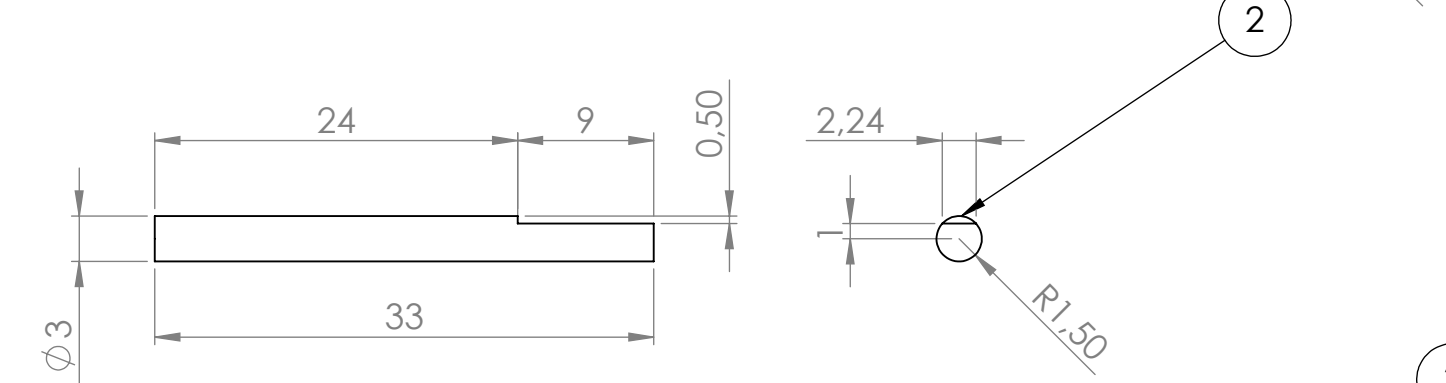
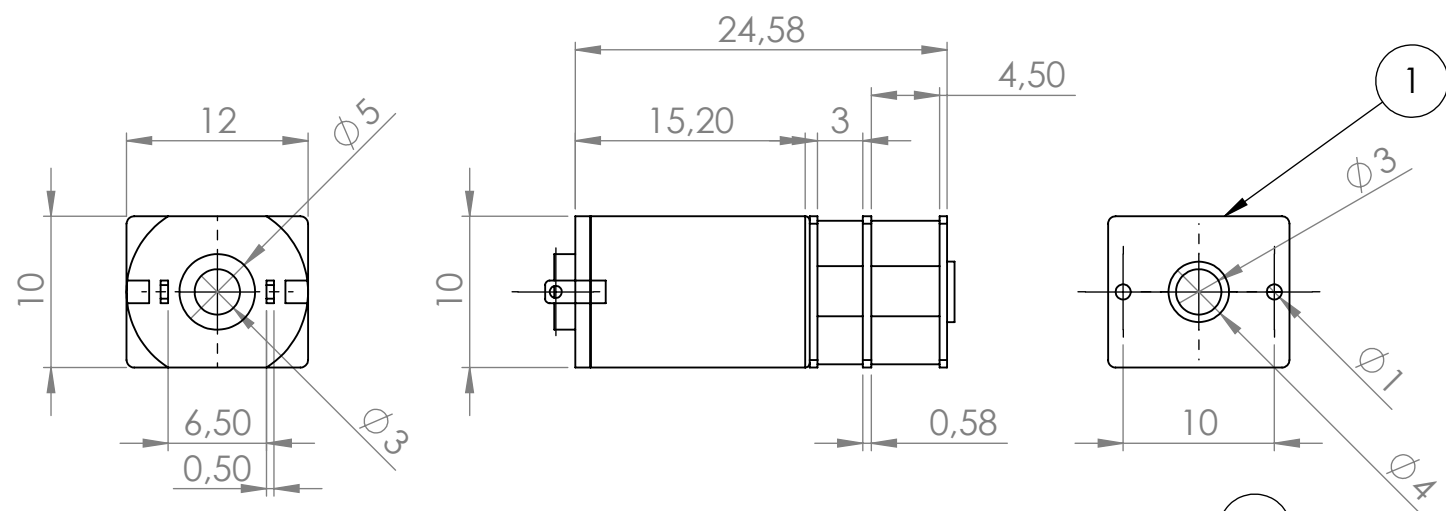


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
				TÍTULO:	
		NOMBRE		FECHA	
DIBUJ.		MONICA MENDEZ			
DIBUJ.		CESAR RIAÑO			
APROB.		RUBEN HERNANDEZ			
CALID.					
MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	
PESO: --- g				VISTA EXPLOSIONADA	
				ESCALA:1:2	
				HOJA 3	
				A3	

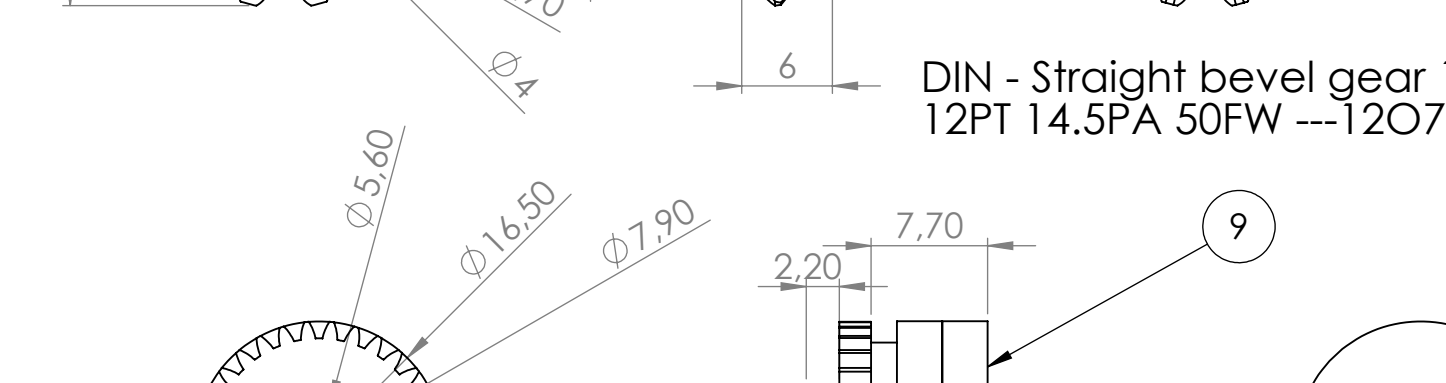
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Motor-Reductor 1:30 12V	6
2	Eje-Motor_Reductor	3
3	DIN - Straight bevel gear 1.375M 12GT 12PT 14.5PA 50FW ---12O75H5MD4.0N	6
4	Acople-Piñon_Conico	2
5	Falange_Distal	3
6	Acople-Piñon_Conico_Falange_Proximal	3
7	Soporte-Motor_Reductor_Tipo_1	3
8	Falange_Proximal	3
9	DIN - Spur gear 0.5M 31T 20PA 2.1FW ---S31A75H50L6.0N	3
10	Acople-Piñon_Recto	3
11	Tornillo_Sin_Fin	3
12	Soporte-Motor_Reductor_Tipo_2	2
13	Base_Falange_Distal	2
14	Pasador_Falange_Proximal	3
15	Pasador_Falange_Distal	3
16	Placa_Base_Gripper	1
17	Acople_Servo_Motor	1
18	Servo_Motor	1
19	Base_Falange_Distal	1
20	Soporte-Motor_Reductor_Tipo_2	1
21	Base_Falange_Distal	1
22	Soporte-Servo_Motor	1
23	B18.6.7M - M2.5 x 0.45 x 13 Type I Cross Recessed PHMS --13N	24
24	Hexagon Nut ISO 4036 - M2.5 - N	24
25	Placa_Plama	1
26	B18.6.7M - M2.5 x 0.45 x 25 Type I Cross Recessed PHMS --25N	5



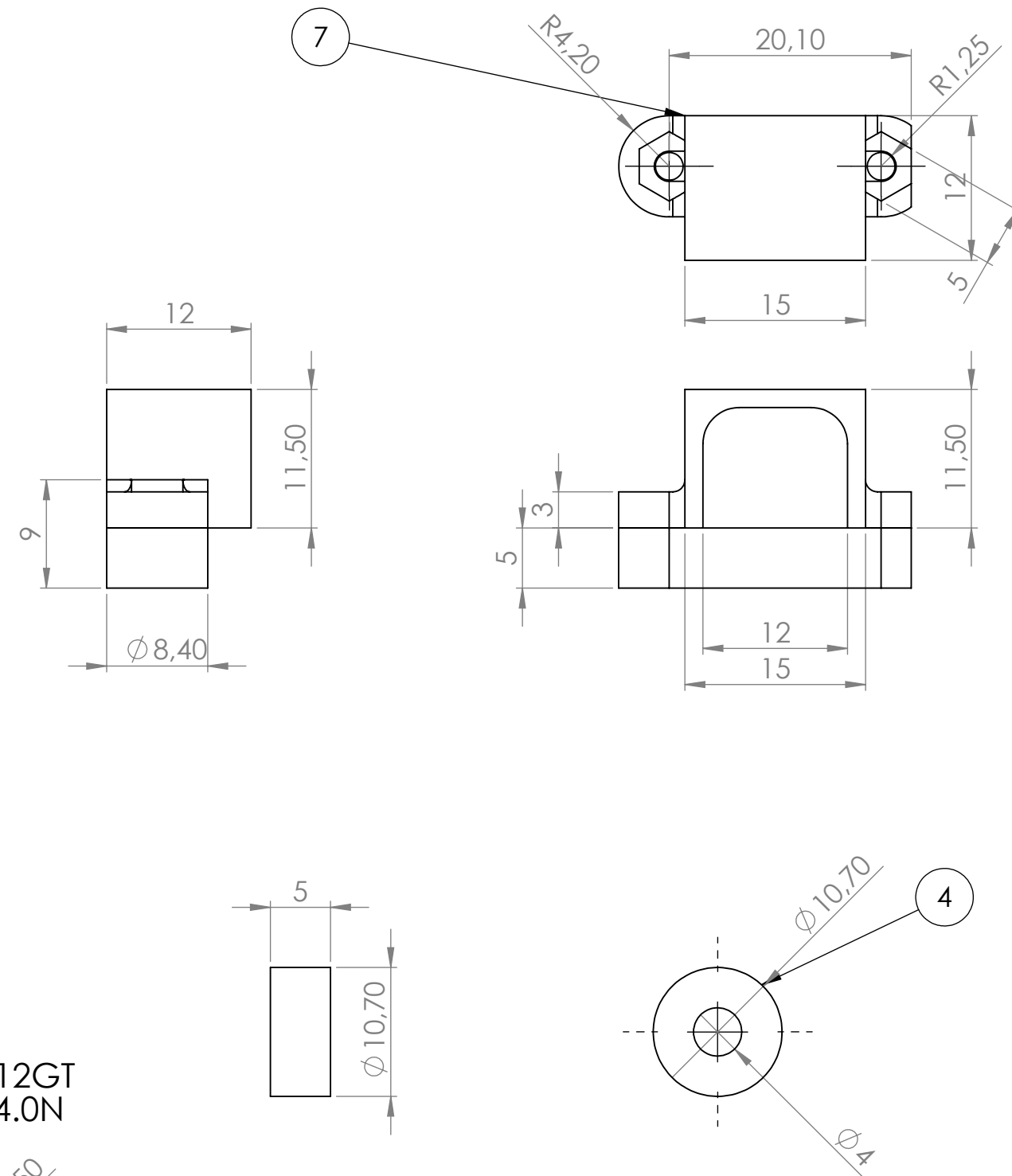
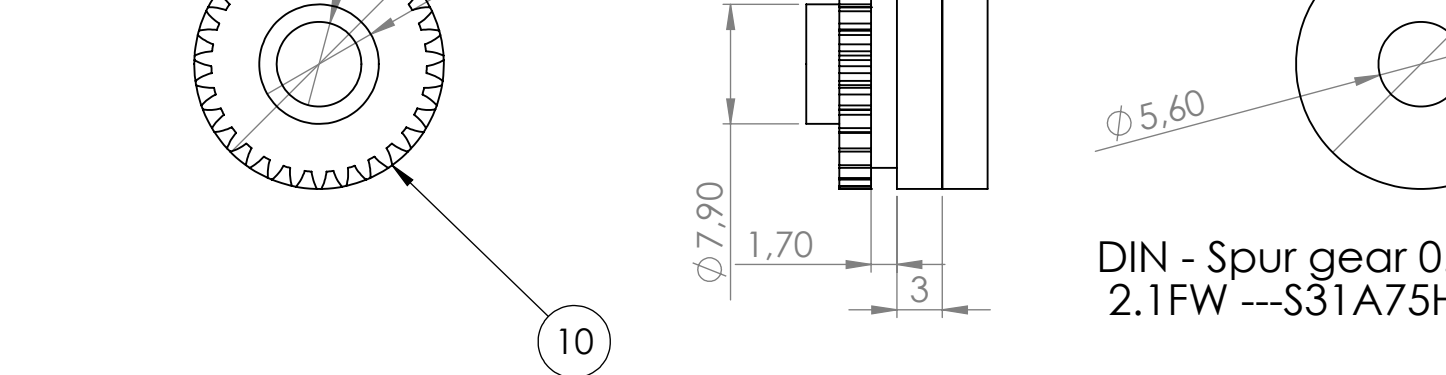
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
		NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.		MONICA MENDEZ		Gripper	
DIBUJ.		CESAR RIAÑO			
APROB.		RUBEN HERNANDEZ			
CALID.				N.º DE DIBUJO	A3
		MATERIAL:		TABLA DE PIEZAS	
		PESO: --- g		ESCALA:1:1	HOJA 4



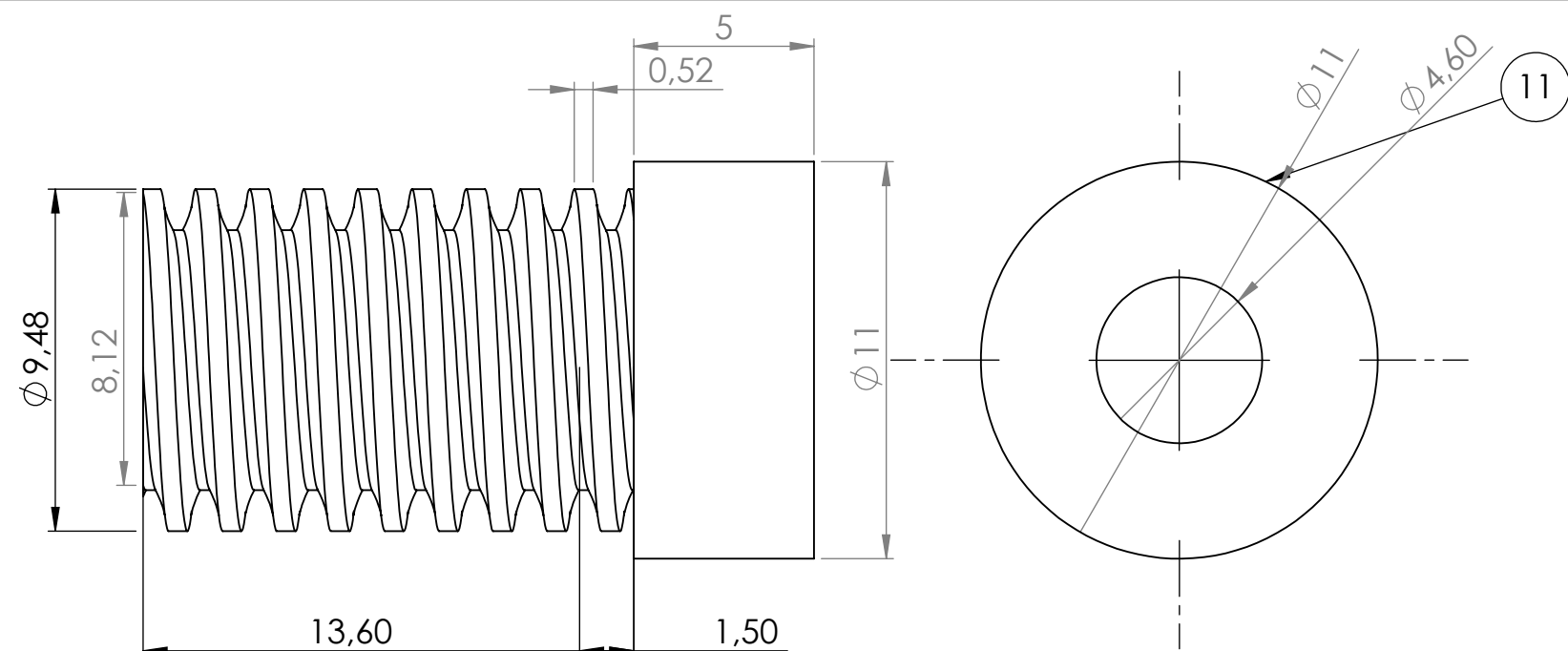
DIN - Straight bevel gear 1.375M 12GT  
12PT 14.5PA 50FW ---12O75H5MD4.0N



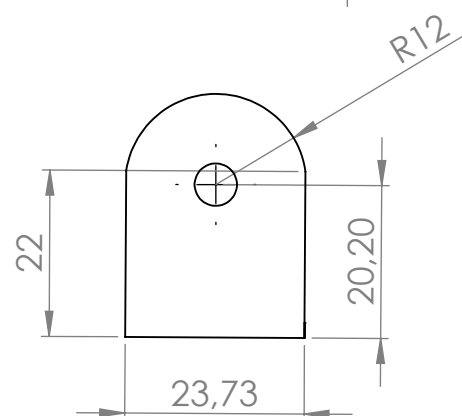
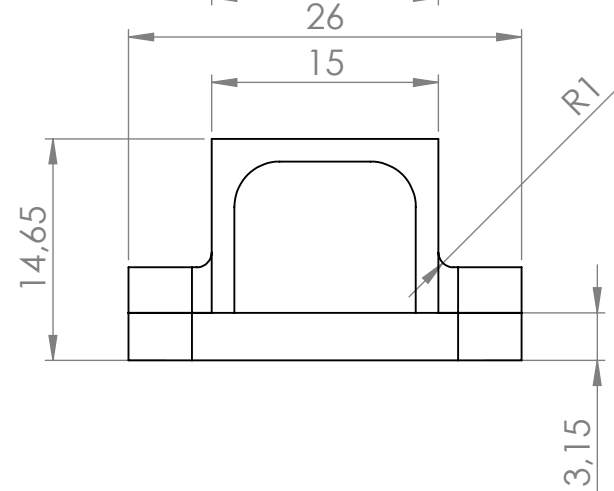
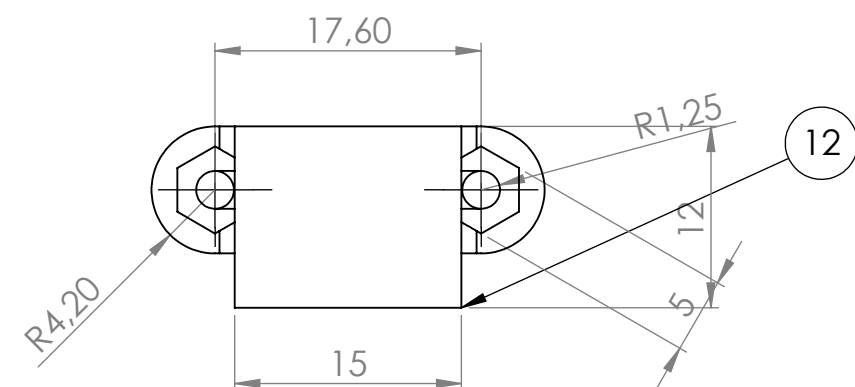
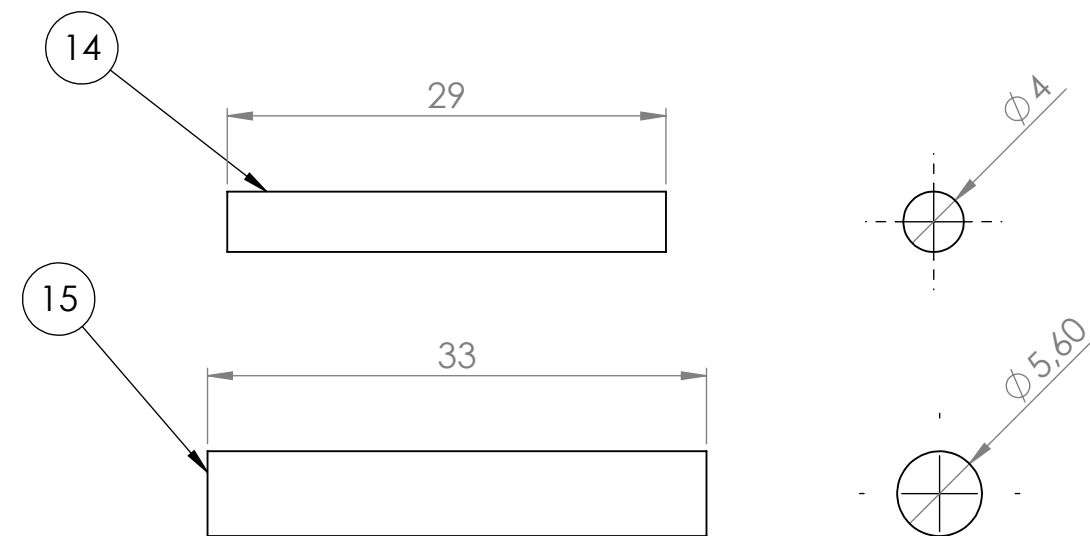
DIN - Spur gear 0.5M 31T 20PA  
2.1FW ---S31A75H50L6.0N



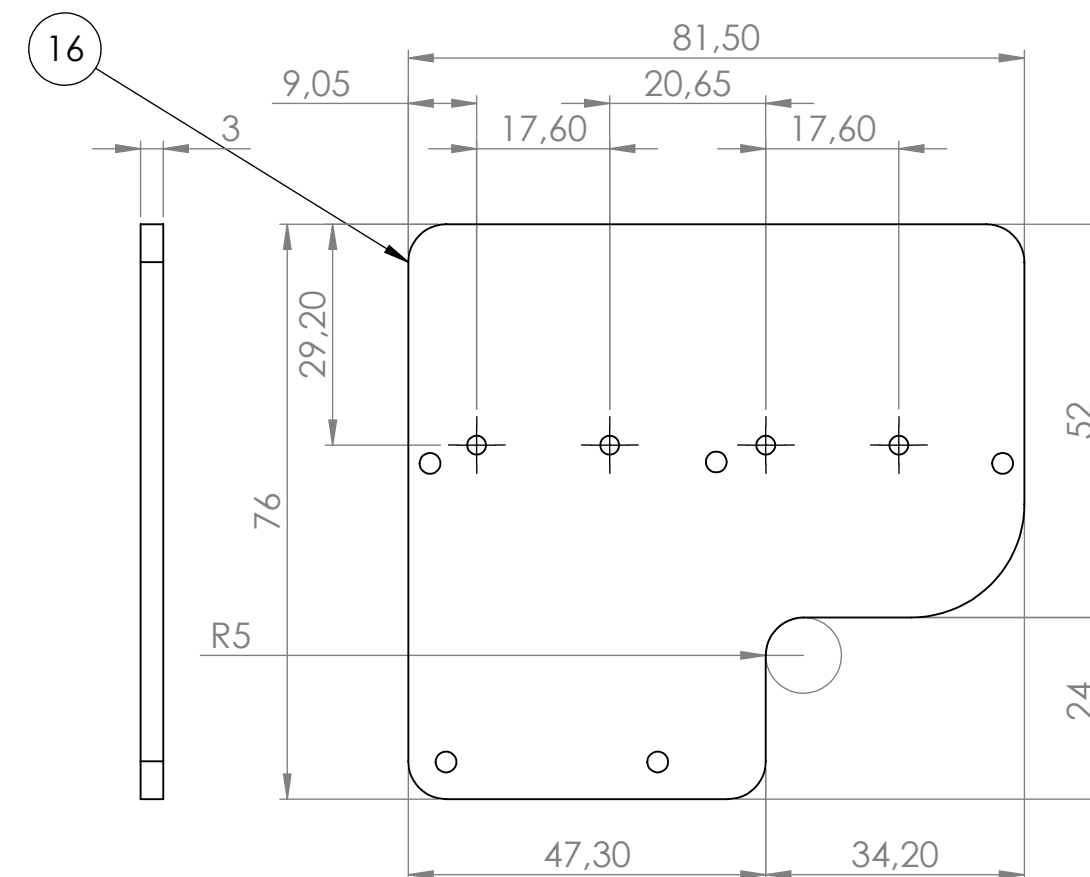
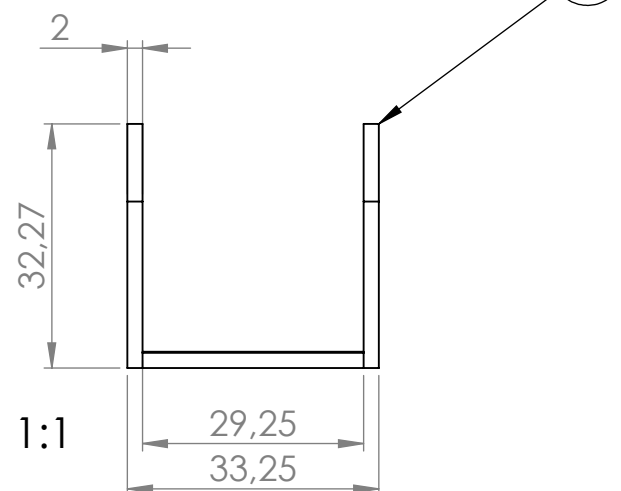
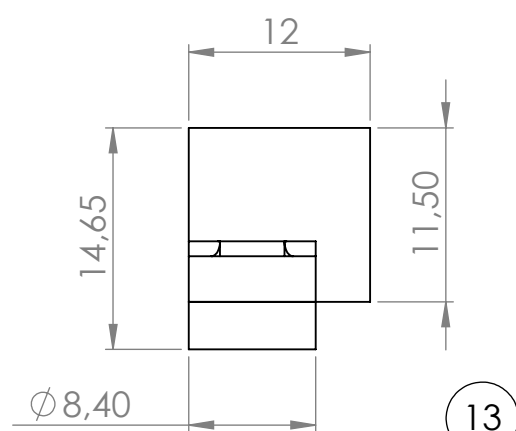
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
DIBUJ.	MONICA MENDEZ	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	CESAR RIAÑO			PIEZAS 1,2,3,4,6,7,9,10	
APROB.	RUBEN HERNANDEZ			N.º DE DIBUJO	
CALID.				DIMENSIONES	
MATERIAL:				A3	
PESO: --- g		ESCALA:2:1		HOJA 5	



escala 5:1

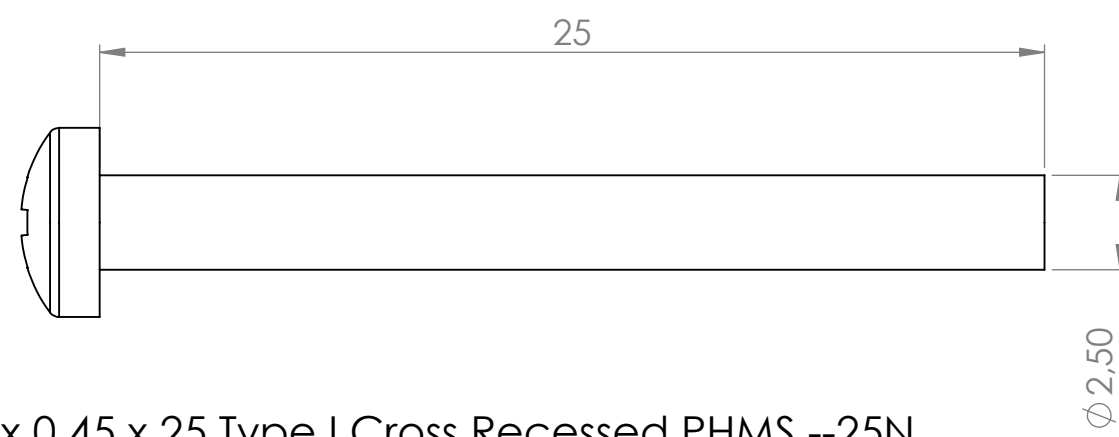
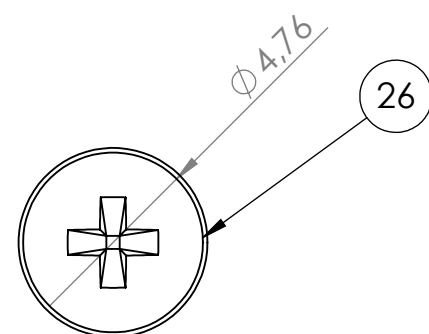
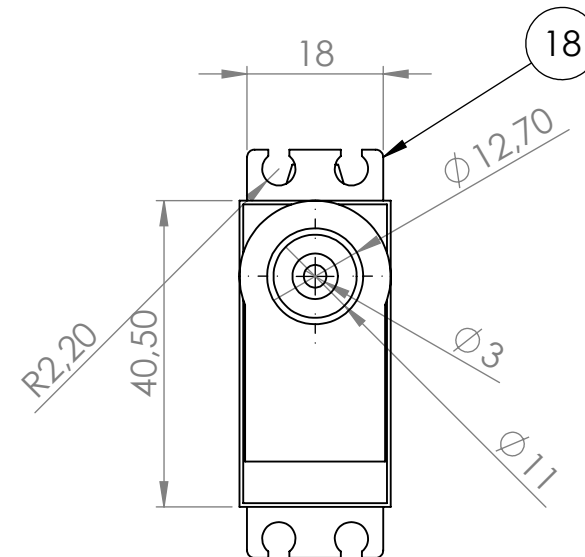
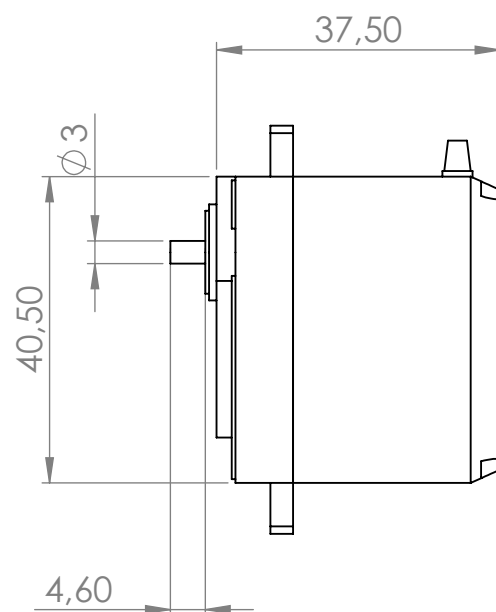
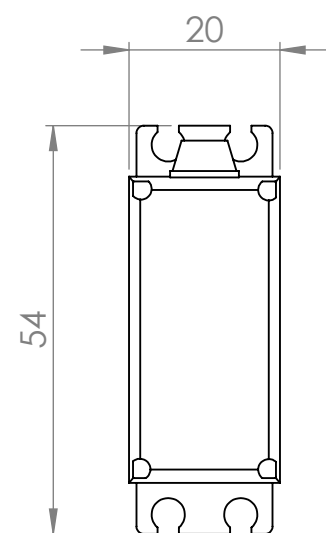


escala 1:1

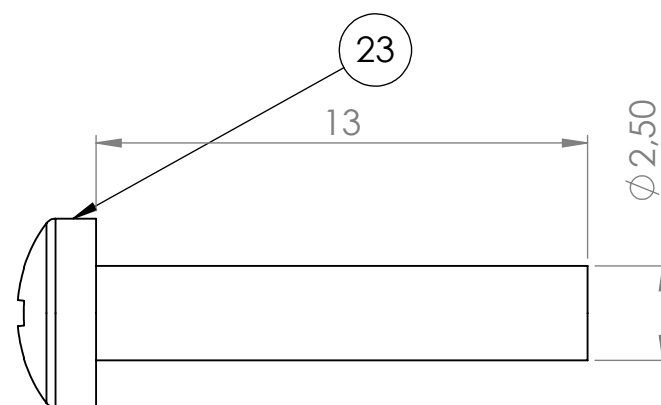
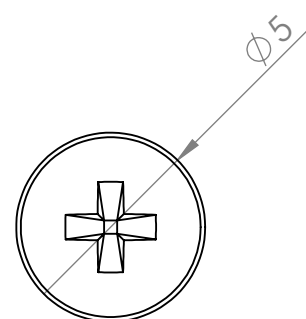


escala 1:1

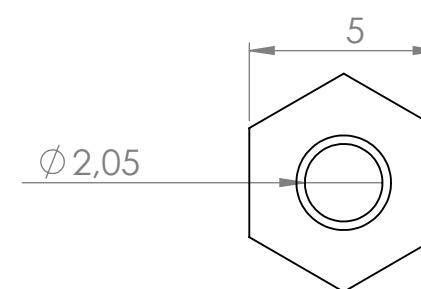
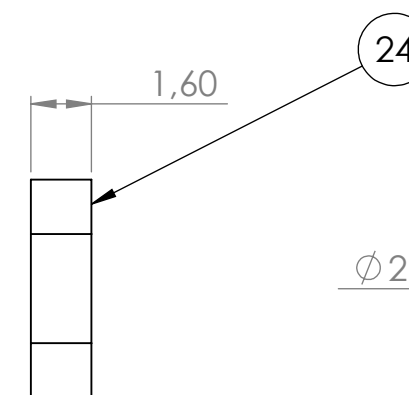
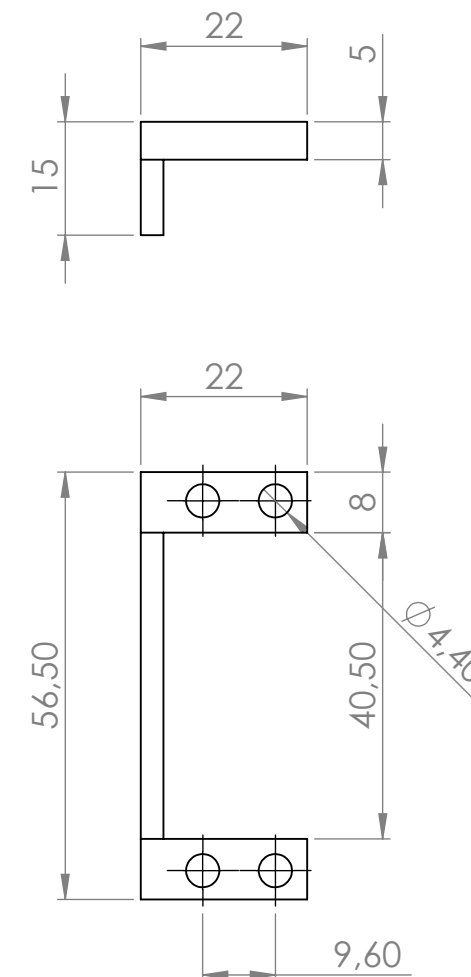
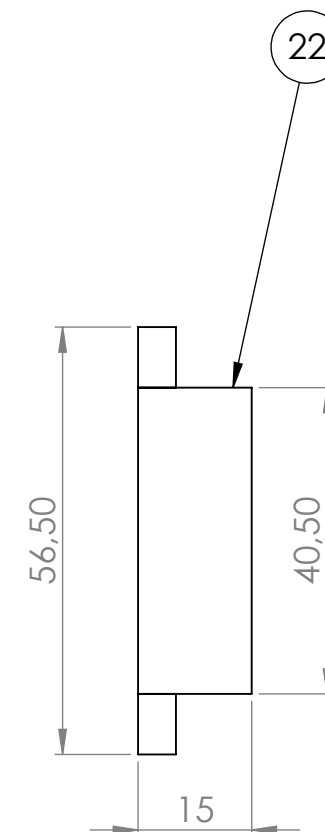
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
DIBUJ.	MONICA MENDEZ	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	CESAR RIAÑO			PIEZAS 11,12,13,14,15,16	
APROB.	RUBEN HERNANDEZ			N.º DE DIBUJO	
CALID.				DIMENSIONES	
MATERIAL:				A3	
PESO: --- g		ESCALA:2:1		HOJA 6	



B18.6.7M - M2.5 x 0.45 x 25 Type I Cross Recessed PHMS --25N



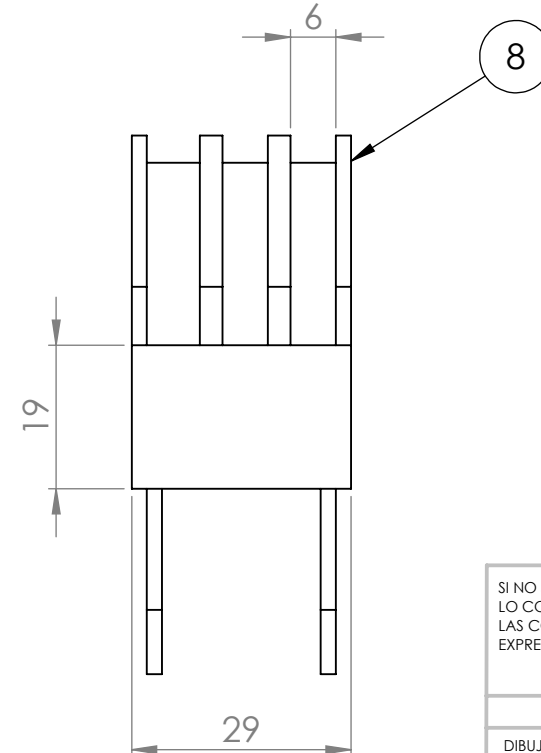
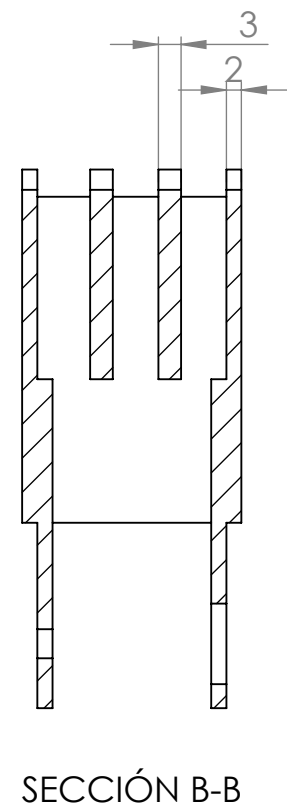
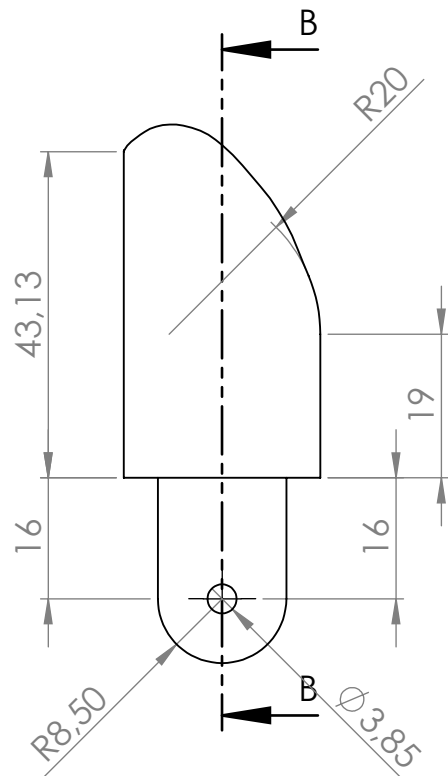
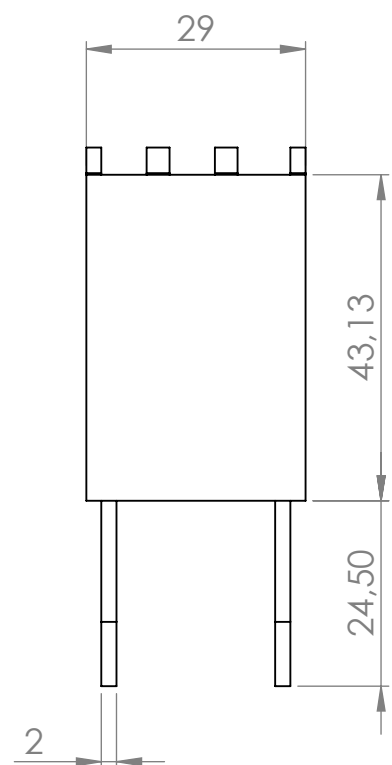
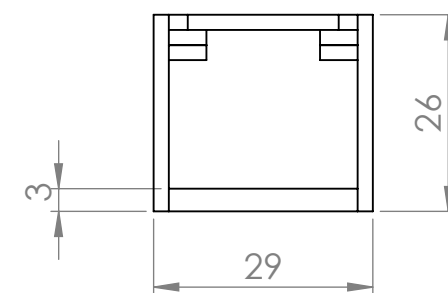
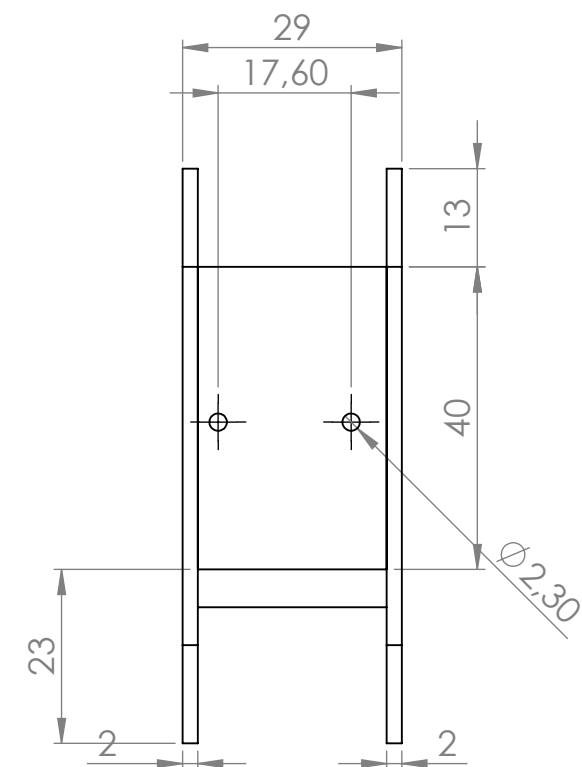
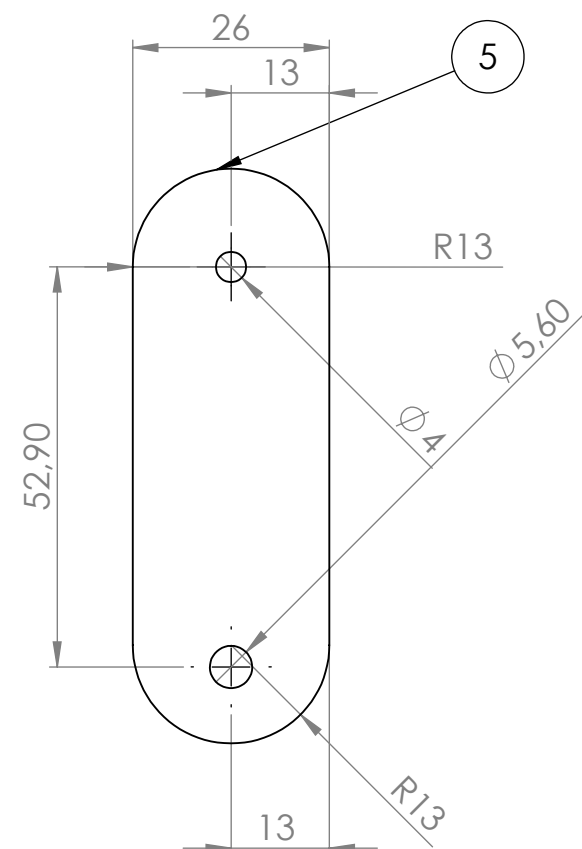
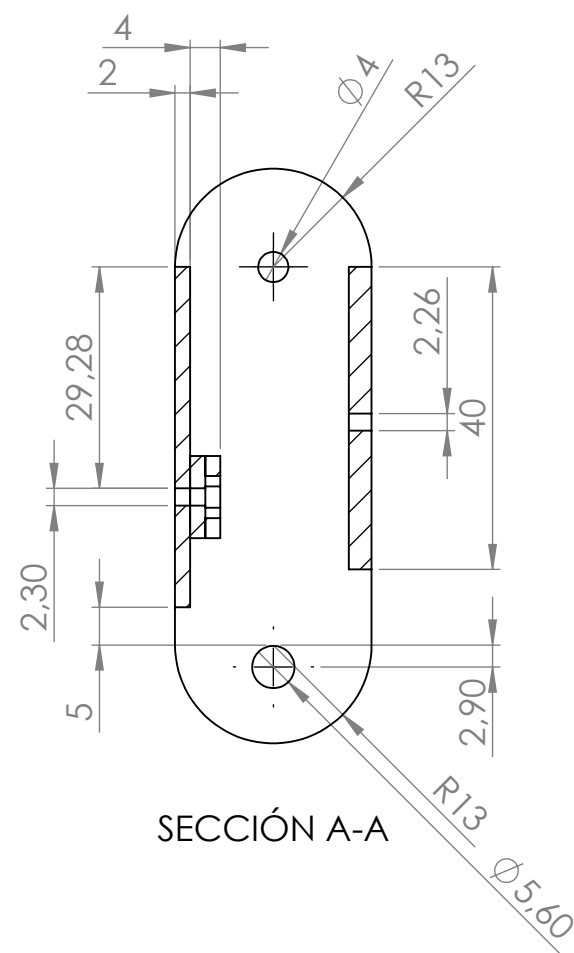
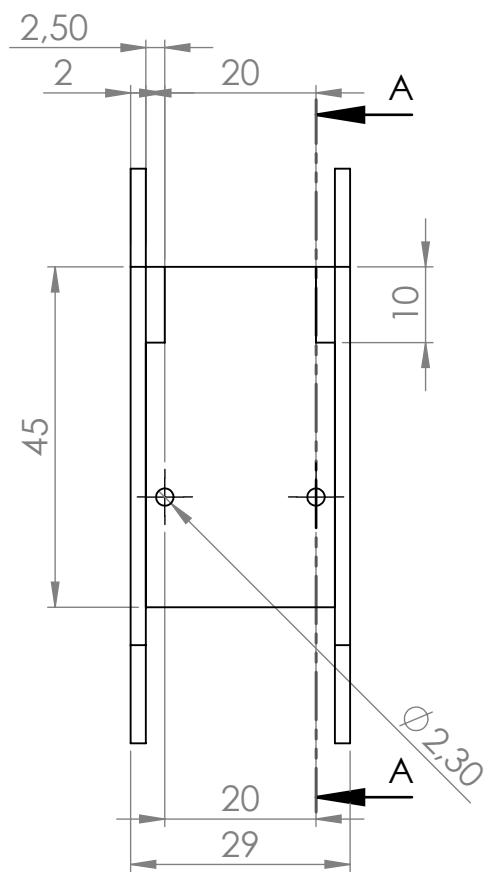
B18.6.7M - M2.5 x 0.45 x 13 Type I Cross Recessed PHMS --13N



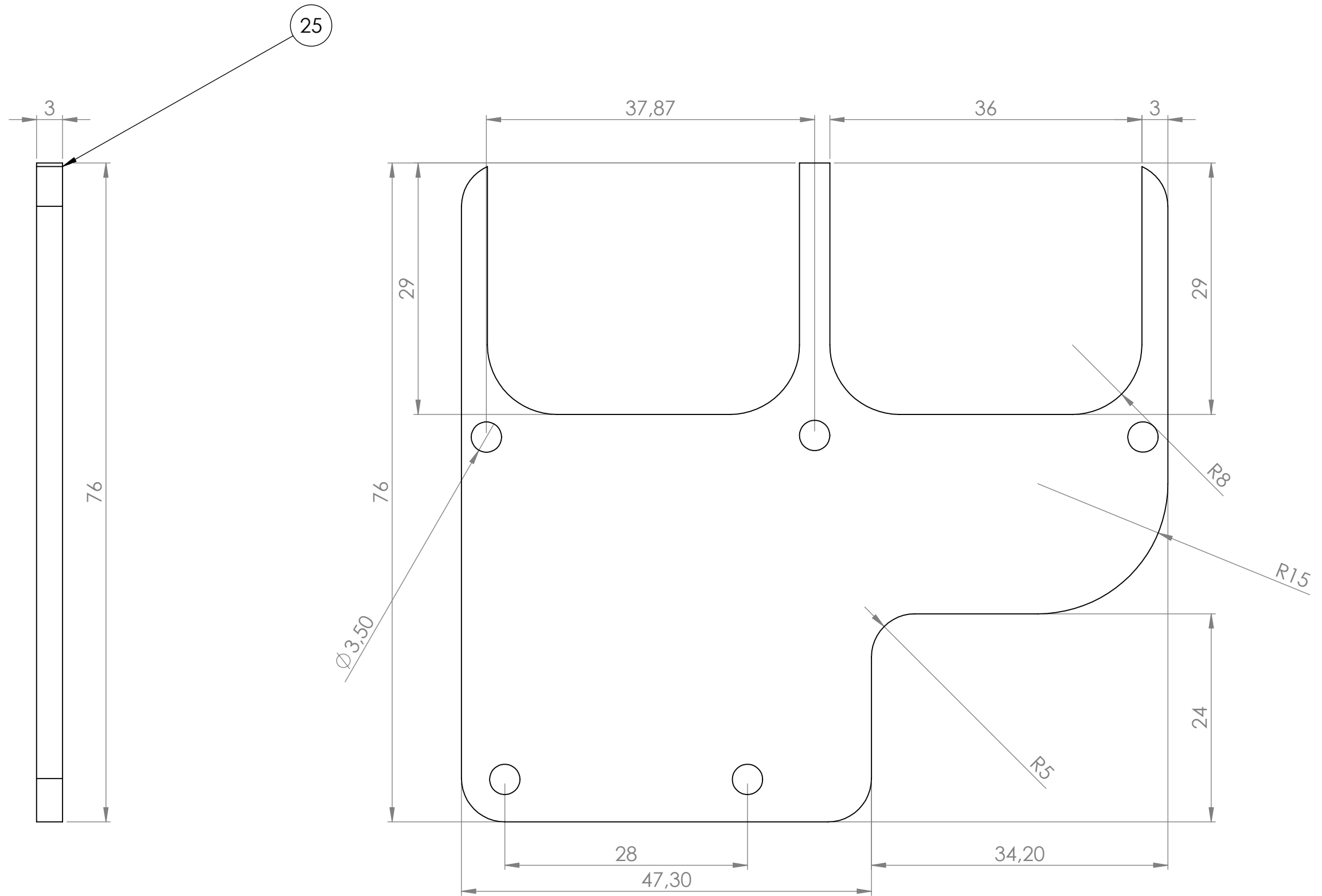
Hexagon Nut ISO 4036 - M2.5 - N

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
DIBUJ.	MONICA MENDEZ	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	CESAR RIAÑO			PIEZAS 18,22,24,26	
APROB.	RUBEN HERNANDEZ			N.º DE DIBUJO	
CALID.				DIMENSIONES	
MATERIAL:				A3	
PESO: --- g		ESCALA: 1:1		HOJA 7	





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:		
DIBUJ.	MONICA MENDEZ		PIEZAS 5,8		
DIBUJ.	CESAR RIAÑO				
APROB.	RUBEN HERNANDEZ				
CALID.					
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		A3
			DIMENSIONES		
PESO: --- g			ESCALA:1:1		
			HOJA 8		



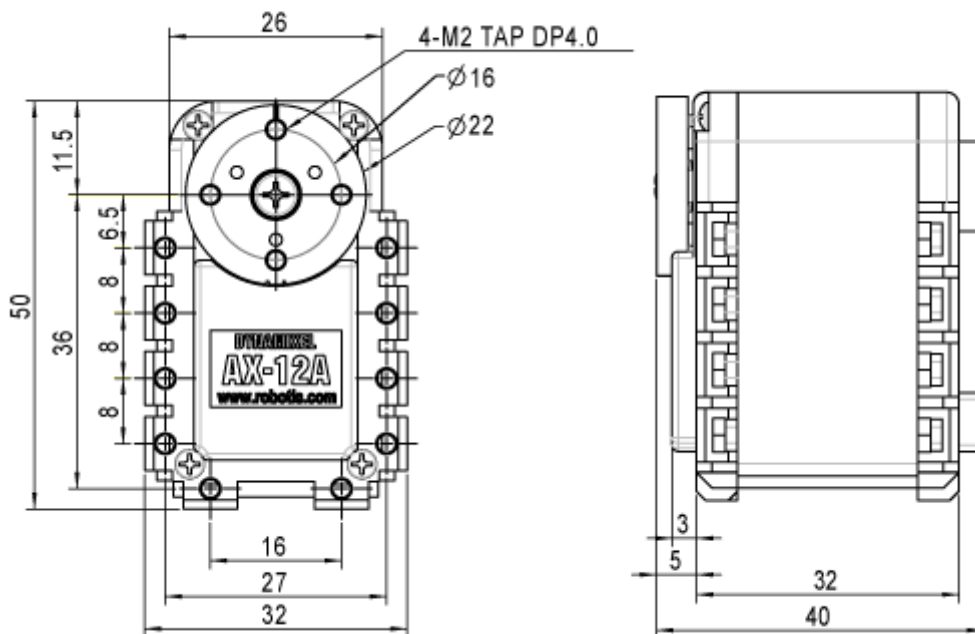
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		NOTAS:		Universidad Piloto de Colombia	
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:		
DIBUJ.	MONICA MENDEZ		PIEZA 25		
DIBUJ.	CESAR RIAÑO				
APROB.	RUBEN HERNANDEZ				
CALID.			N.º DE DIBUJO		A3
	MATERIAL:		DIMENSIONES		
	PESO: --- g		ESCALA:2:1		
			HOJA 9		

## Anexo 4. Hoja técnica Dynamixel

El actuador de la robustez de la serie de Dynamixel es un actuador elegante, modular que incorpora a engrane el reductor, un motor de la C.C. de la precisión y un trazado de circuito del control con funcionalidad del todos en un solo paquete.

A pesar de su tamaño compacto, puede producir el alto esfuerzo de torsión y es hecho con los materiales de la alta calidad para proporcionar la fuerza necesaria y estructural resistencia para soportar fuerzas externas grandes. También tiene la capacidad de detectar y de actuar sobre condiciones internas tales como cambios en voltaje interno de la temperatura o de **Fuente**. El actuador de la robustez de la serie de Dynamixel tiene muchas ventajas sobre productos similares.

**Figura 86.** Aspecto del Servomotor Dynamixel AX-12



**Fuente:** User's Manual Dynamixel AX-12, 2006-06-14[28]

La posición y la velocidad del control de la precisión se pueden controlar con una resolución de 1024 pasos. La conformidad que conduce el grado de conformidad se puede ajustar y especificar en la posición que controla.

- **Regeneración:** La regeneración para la posición angular, la velocidad angular, y el esfuerzo de torsión de la carga están disponible
- **Sistema de alarma:** El actuador de la robusteza de la serie de Dynamixel puede alertar al usuario cuando los parámetros se desvían de las gamas definidas por el usuario (e.g. temperatura, esfuerzo de torsión, voltaje, etc internos) y pueden también dirige problema automáticamente (e.g. esfuerzo de torsión apagado)
- **Comunicación:** El cableado es fácil con la conexión de la cadena de margarita, y comunicación de la ayuda acelera a el 1M BPS.
- **Control distribuido:** La posición, la velocidad, la conformidad, y el esfuerzo de torsión se pueden fijar con un paquete del solo comando así permitiendo al procesador principal controlar muchas unidades de Dynamixel incluso con muy pocos recursos.
- **Plástico de la ingeniería:** El cuerpo principal de la unidad se hace con el plástico de la ingeniería de la alta calidad que la permite para manejar altas cargas del esfuerzo de torsión.
- **Cojinete del eje:** Un cojinete se utiliza en el eje final para no asegurar ninguna degradación de la eficacia con alto externo cargas.
- **Estado LED:** El LED puede indicar el estado de error al usuario

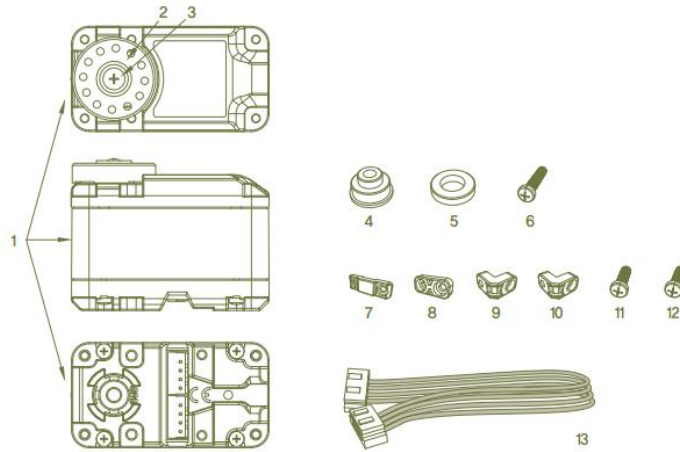
#### Especificaciones:

**Tabla5.** Especificaciones Servo Dynamixel AX-12[6]

	AX-12
Peso (g)	55
Relación de engranaje de reducción	1/254
Voltaje de entrada	7V a 10 V
Par de retención máximo (kgf.cm)	12 a 16.5
Sec/60 grados	0.269 a 0.196

# Anexo 5. Hoja técnica Herkulex

## Parts List



- 1 Servo : 1ea Horn : 1ea
- 2 Horn Bolt(BHT 2.6X8) : 1ea
- 3 Wheel Horn Bushing : 1ea
- 4 Wheel Horn Washer : 1ea
- 5 Wheel Horn Bolt(PHM 3X8) : 1ea
- 6 Cable Guard : 2ea
- 7 I-type Joint : 2ea
- 8 L-type Joint : 2ea
- 9 L-type Joint(Single Nut) : 4ea
- 10 Bracket Bolt(PHT 2X5) : 4ea (※ DRS-0201 replaced by PHM 2X5)
- 11 Joint Bolt(PHM 2X5) : 12ea
- 12 Wire Harness(200mm) : 1ea

## Smart Servo

DRS-0101 and DRS-0201 are state of the art modular smart servos incorporating motor, gear reducer, control circuitry and communications capability in one single package. Both servos are capable of detecting and responding to internal changes in temperature and voltage supply.

## Simple Assembly and wiring

Small, light, and easy to assemble structure. Our servos make joint assembly an easy job with an added advantage of simple wiring. Two connectors attached to each servo allows serial connection as well as parallel connection if required.

### Highest Stall Torque in relation to size and Power

In relation to size, weight, and power requirement, our servos have the highest stall torque in its class.

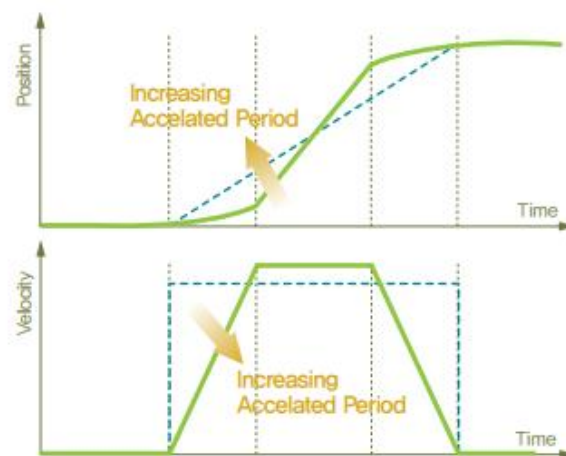
### Versatility from two different models

By introducing two different models of the same size but with different torque and speed, our customers have the choice to choose and mix and match the servos to assemble custom joints. \*DRS-0101 : Stall Torque 12kgf.cm @7.4DCV [166.8 ozf.in.], Speed 0.166s/60°@7.4

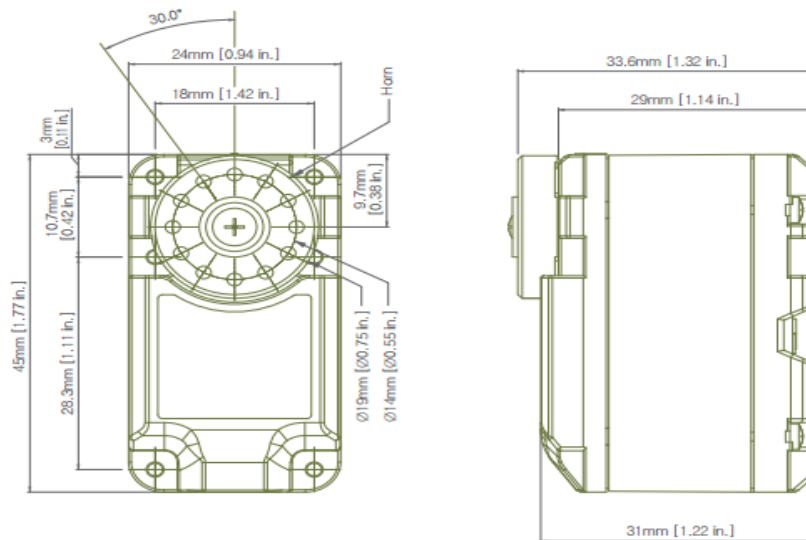
\*DCV DRS-0201 : Stall Torque 24kgf.cm @7.4DCV [333.6 ozf.in.], Speed 0.147s/60°@7.4DCV

### Smooth Movement

Once the servo receives a movement command, it automatically creates a trapezoidal type speed profile like the diagram below to control the position. With the servo operating according to the acceleration/deceleration profile, it suppresses vibrations caused by the sudden acceleration and deceleration as found in the square type speed profile and increases the energy efficiency while leading to smoother movement. The servo chooses the trapezoidal type speed profile as a default but profile could be changed according to usage to trapezoidal type, square type or triangle type.



Dimension / Weight	45mm(W) x 24.0mm(D) x 31mm(H) / 45g [1.59 oz] 45mm(W) x 24.0mm(D) x 31mm(H) / 60g [2.12 oz] (DRS-0201) [1.77 in.(W) x 0.94 in.(D) x 1.22 in.(H)]
Reduction Ratio Gear Material	1 : 266 Super Engineering Plastic, Heavy Duty Metal (DRS-0201)
Input Voltage Rated Current Motor	7~12VDC(Optimized 7.4V) 450mA @ 7.4V : 1.7kgf.cm, 670mA @ 7.4V : 2.2kgf.cm (DRS-0201) Carbon Brush Cored DC, Metal Brush Coreless DC (DRS-0201)
Stall Torque / Maximum Speed	12kgf.cm [166.8 ozf.in.] / 0.166s/60 ° @7.4V 24kgf.cm [333.6 ozf.in.] / 0.147s/60 ° @7.4V (DRS-0201)
Resolution	0.325 °
Operating Angle Temperature	320 ° , Continuous Rotation 0 ~ 85°C [32°F~185°F]
Communication Link ID, Maximum Baud Rate	Full Duplex Asynchronous Serial(TTL Level), Binary Packet, Multi Drop 0 ~ 253, 254(Broadcast only) 0.67Mbps
Feedback	Position, Speed, Temperature, Load, Voltage etc.
Control Algorithm	PID, Feedforward, Trapezoidal Velocity Profile, Velocity Override, Torque Saturator & Offset, Overload Protection, Neutral Calibration, Dead Zone 54 Selectable Setting Parameters(※ Servo Manager Kit Required)



**Fuente** <http://u-robot.com.mx/Portals/0/productdocs/1fc54769-00ae-4d01-824b-a9181ffd0519.pdf>

## Anexo 6. Hoja técnica Motor-Reductor

**Descripción:** Este motor del fabricante Pololu tiene un eje en forma de "D" de 9.27mm de longitud y un diámetro de 3mm. Gracias a estas características puedes usar este motor con un perfecto acople con las ruedas y orugas Pololu que te listamos a continuación:

- **Rueda Pololu 32x7mm**
- **Ruedas Pololu 42x19mm**
- **Ruedas Pololu 60x8mm**
- **Ruedas Pololu 90x10mm**
- **Oruga Pololu 22T**

El micromotor pesa aproximadamente 0,35 oz (10 g) ,versiones con el eje del motor extendido tienen un eje de diámetro de 1 mm que sobresale 4,5 mm desde la parte trasera del motor, entre los dos terminales del motor. Además de esto una buena opción de [Encoder para micromotor con eje extendido](#), para controlar tus micromotores de manera optima.

**Dimensiones:** 24 x 10 x 12 mm

**Peso:** 0,34 oz.

**Diámetro del eje:** 3 mm

**Características:**

- Relación de transmisión:10:1
- Rango de alimentación: 3 a 9 V (no se recomienda alimentarlo a la máxima tensión)
- Velocidad @ 6V: 2200 rpm
- Consumo sin carga @ 6V: 40 mA
- Consumo con carga @ 6V: 700 mA
- torque 6V: 3 oz · en

**Fuente:** tienda robótica. **URL:** <http://tienda.tdrobotica.co>



## Anexo 7. Hoja técnica Servo-Motor

**Descripción:** Este servo es simple y de bajo costo, es un servo de alta calidad para todas tus necesidades de mecatrónica y robótica. Servo mediano con conector de tres pines estándar, sabias que el servo incorpora una parte control que te permite moverlo a la posición deseada en un rango de 0° a 179°.

Si quieres controlar el servomotor de sus 0° a los 179° podrías usar **Arduino** o un **Controlador de servos**

### **Características:**

- 180 grados de rotación
- Voltaje de operación: 4.8V ~ 6.0V
- Velocidad de trabajo: 0.20sec/60 grado (4,8V)
- Velocidad de trabajo: 0.18sec/60 grado (6V)
- Par de salida: 2.8kg/cm (19.6oz/in) (4,8V)
- Par de salida: 3.2kg/cm (19.6oz/in) (6V)

**Fuente:** tienda robótica. **URL:** <http://tienda.tdrobotica.co/>

# Anexo 8. Hoja técnica Sensor de flexión

## Sensor flexible



### Features

- Angle Displacement Measurement
- Bends and Flexes physically with motion device
- Possible Uses
  - Robotics
  - Gaming (Virtual Motion)
  - Medical Devices
  - Computer Peripherals
  - Musical Instruments
  - Physical Therapy
  - Simple Construction
  - Low Profile

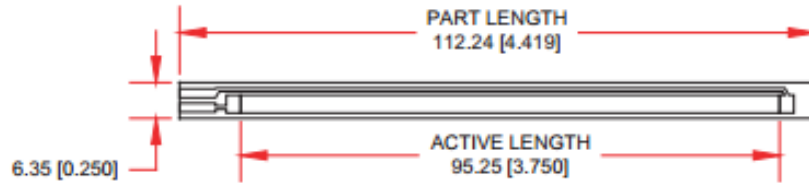
### Mechanical Specifications

- Life Cycle: >1 million
- Height: 0.43mm (0.017")
- Temperature Range: -35°C to +80°C

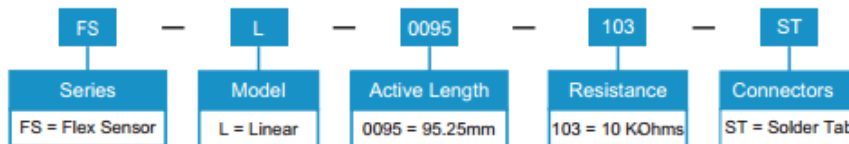
### Electrical Specifications

- Flat Resistance: 10K Ohms
- Resistance Tolerance:  $\pm 30\%$
- Bend Resistance Range: 60K to 110K Ohms
- Power Rating : 0.50 Watts continuous. 1 Watt Peak

## Dimension Diagram- Stock Flex Sensor



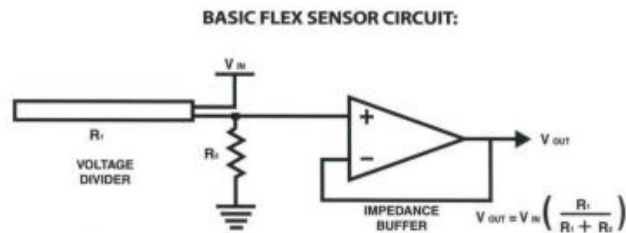
## How to Order- Stock Flex Sensor



## How it Works



## Schematics



*Following are notes from the ITP Flex Sensor Workshop*

"The impedance buffer in the [Basic Flex Sensor Circuit] (above) is a single sided operational amplifier, used with these sensors because the low bias current of the

op amp reduces error due to source impedance of the flex sensor as voltage divider. Suggested op amps are the LM358 or LM324." "You can also test your flex sensor using the simplest circuit, and skip the op amp."

# Anexo 9. Sensor de fuerza

## Force Sensing Resistors An Overview of the Technology

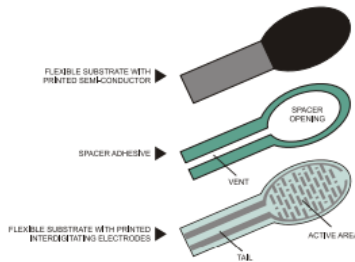


Figure 1: FSR Construction

Force Sensing Resistors (FSR) are a polymer thick film (PTF) device which exhibits a decrease in resistance with an increase in the force applied to the active surface. Its force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronic devices. FSRs are not a load cell or strain gauge, though they have similar properties. FSRs are not suitable for precision measurements.

### Force vs. Resistance

The force vs. resistance characteristic shown in Figure 2 provides an overview of FSR typical response behavior. For interpretational convenience, the force vs. resistance data is plotted on a log/log format. These data are representative of our typical devices, with this particular force-resistance characteristic being the response of evaluation part # 402 (0.5" [12.7 mm] diameter circular active area). A stainless steel actuator with a 0.4" [10.0 mm] diameter hemispherical tip of 60 durometer polyurethane rubber was used to actuate the FSR device. In general, FSR response approximately follows an inverse power-law characteristic (roughly  $1/R$ ). Referring to Figure 2, at the low force end of the force-resistance characteristic, a switchlike response is evident. This turn-on threshold, or 'break force', that swings the resistance from greater than 100 kΩ to about 10 kΩ (the beginning of the dynamic range that follows a power-law) is determined by the substrate and overlay thickness and flexibility, size and shape of the actuator, and spacer-adhesive thickness (the gap between the facing conductive elements). Break force increases with increasing substrate and overlay rigidity, actuator size, and spacer/adhesive thickness. Eliminating the adhesive, or keeping it well away from the area where the force is being applied, such as the center of a large FSR device, will give it a lower rest resistance (e.g. stand-off resistance).

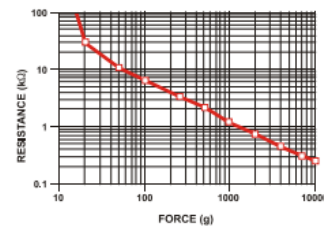


Figure 2: Resistance vs. Force

At the high force end of the dynamic range, the response deviates from the power-law behavior, and eventually saturates to a point where increases in force yield little or no decrease in resistance. Under these conditions of Figure 2, this saturation force is beyond 10 kg. The

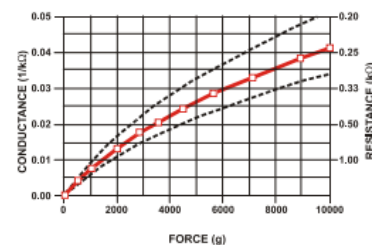


Figure 3:  
Conductance vs. Force (0-10Kg)

saturation point is more a function of pressure than force. The saturation pressure of a typical FSR is on the order of 100 to 200 psi. For the data shown in Figures 2, 3 and 4, the actual measured pressure range is 0 to 175 psi (0 to 22 lbs applied over 0.125 in<sup>2</sup>). Forces higher than the saturation force can be measured by spreading the force over a greater area; the overall pressure is then kept below the saturation point, and dynamic response is maintained. However, the converse of this effect is also true, smaller actuators will saturate FSRs earlier in the dynamic range, since the saturation point is reached at a lower force.

### Force vs. Conductance

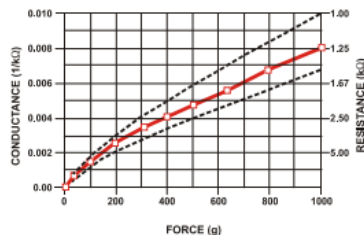


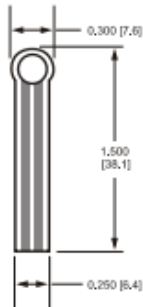
Figure 4:  
Conductance vs. Force (0-1Kg) Low Force Range

In Figure 3, the conductance is plotted vs. force (the inverse of resistance:  $1/r$ ). This format allows interpretation on a linear scale. For reference, the corresponding resistance values are also included on the right vertical axis. A simple circuit called a current-to-voltage converter (see page 21) gives a voltage output directly proportional to FSR conductance and can be useful where response linearity is desired. Figure 3 also

includes a typical part-to-part repeatability envelope. This error band determines the maximum accuracy of any general force measurement. The spread or width of the band is strongly dependent on the repeatability of any actuating and measuring system, as well as the repeatability tolerance held by Interlink Electronics during FSR production. Typically, the part-to-part repeatability tolerance held during manufacturing ranges from  $\pm 15\%$  to  $\pm 25\%$  of an established nominal resistance.

Figure 4 highlights the 0-1 kg (0-2.2 lbs) range of the conductance-force characteristic. As in Figure 3, the corresponding resistance values are included for reference. This range is common to human interface applications. Since the conductance response in this range is fairly linear, the force resolution will be uniform and data interpretation simplified. The typical part-to-part error band is also shown for this touch range. In most human touch control applications this error is insignificant, since human touch is fairly inaccurate. Human factors studies have shown that in this force range repeatability errors of less than  $\pm 50\%$  are difficult to discern by touch alone.

## Descriptions and Dimensions



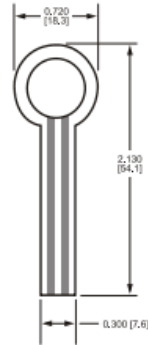
**Figure 5:** Part No. 400 (0.2" Circle)

**Active Area:** 0.2" [5.0]

**diameter Nominal Thickness:** 0.012" [0.30 mm]

### Material Build:

Semiconductive layer 0.004" [0.10] PES  
Spacer adhesive 0.002" [0.05] Acrylic  
Conductive layer 0.004" [0.10] PES Rear  
adhesive 0.002" [0.05] Acrylic Connector  
options a. No connector b. Solder Tabs (not  
shown) c. AMP Female connector



**Figure 6:** Part No. 402 (0.5" Circle)

**Active Area:** 0.5" [12.7]

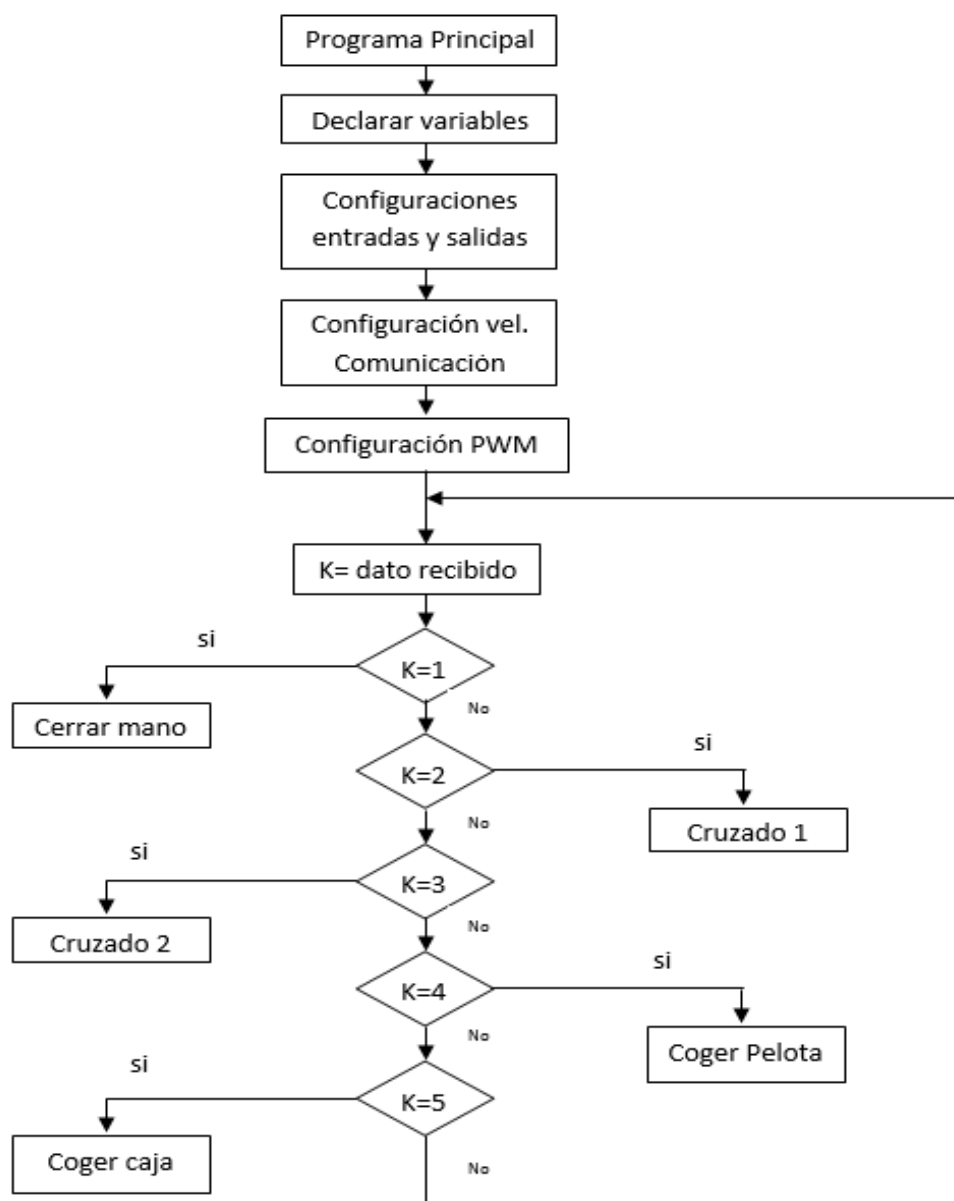
**diameter Nominal thickness:** 0.018" [0.46 mm]

### Material Build:

Semiconductive Layer 0.005" [0.13] Ultem  
Spacer Adhesive 0.006" [0.15] Acrylic  
Conductive Layer 0.005" [0.13] Ultem Rear  
Adhesive 0.002" [0.05] Acrylic Connector a.  
No connector b. Solder Tabs (not shown) c.  
AMP Female connector

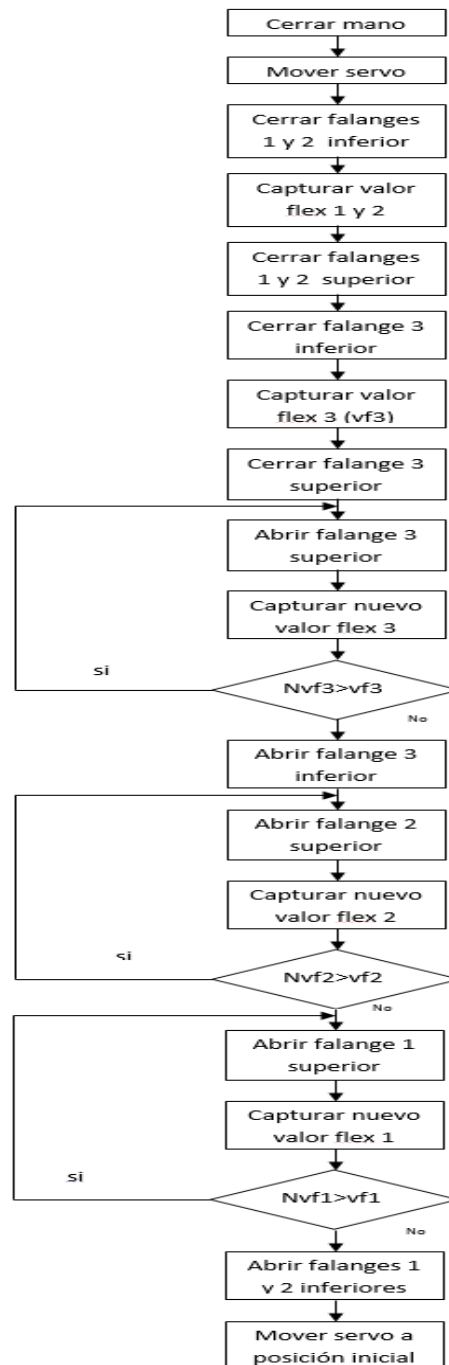
**Fuente:** tienda robótica. **URL:** <http://tienda.tdrobotica.co/>

## Anexo 10. Diagrama de flujo programa principal

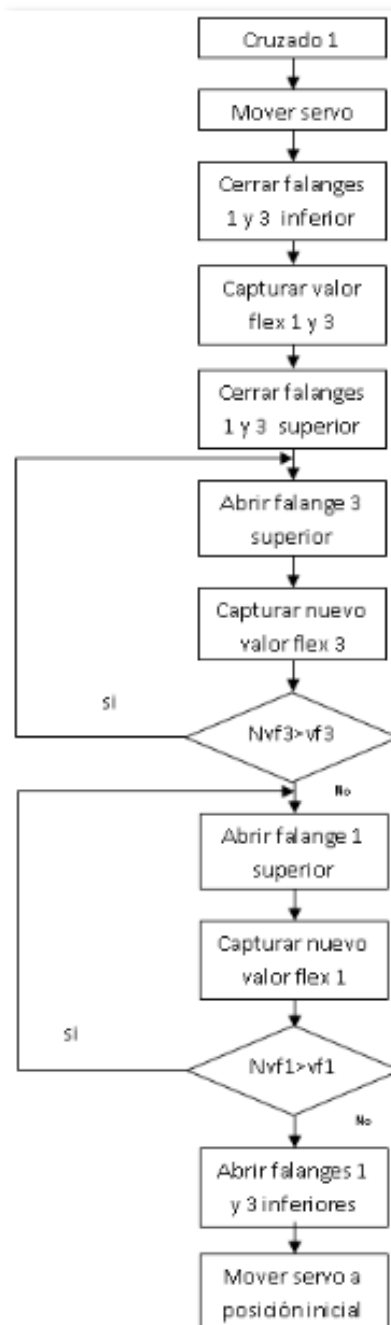




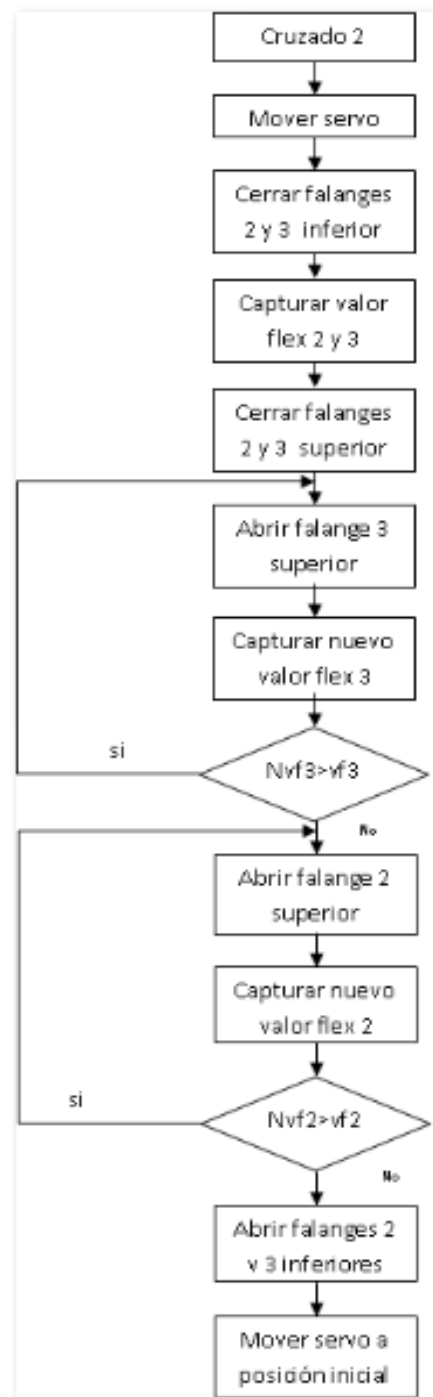
## Anexo 11. Diagrama de flujo programa cerrar mano



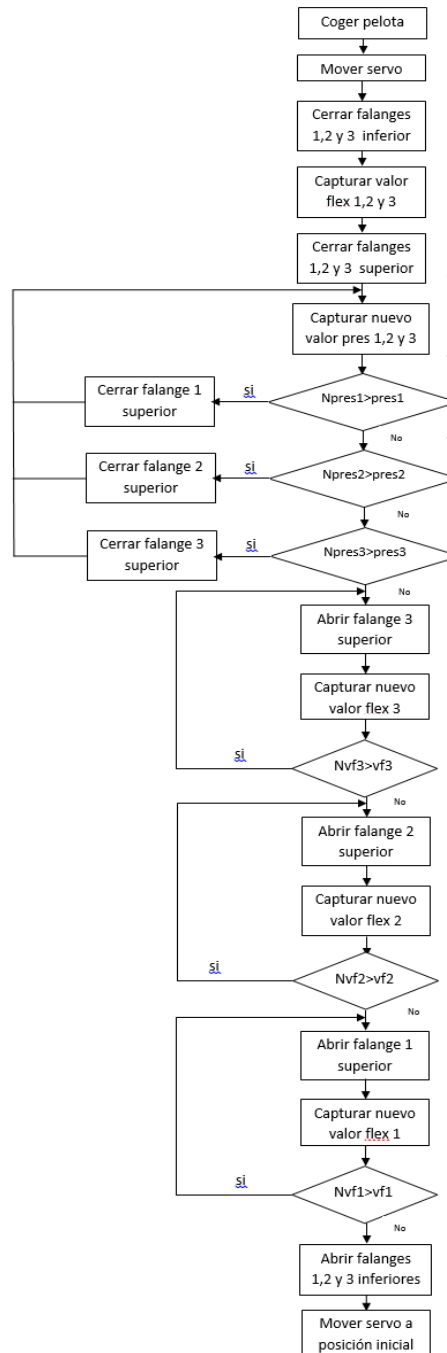
## Anexo 12. Diagrama de flujo programa cruzado 1



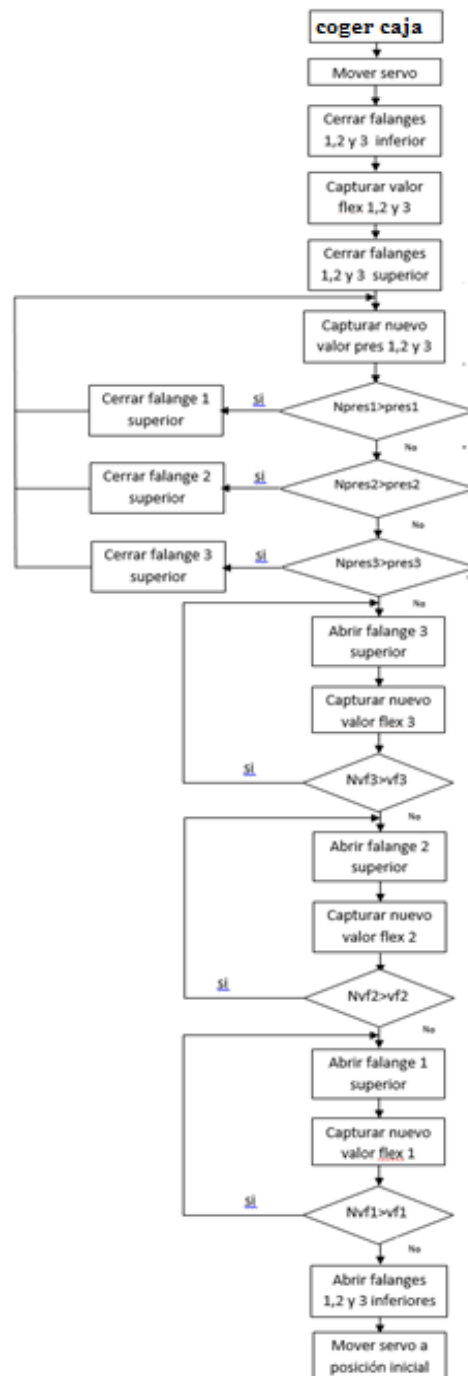
## Anexo 13. Diagrama de flujo programa cruzado 2



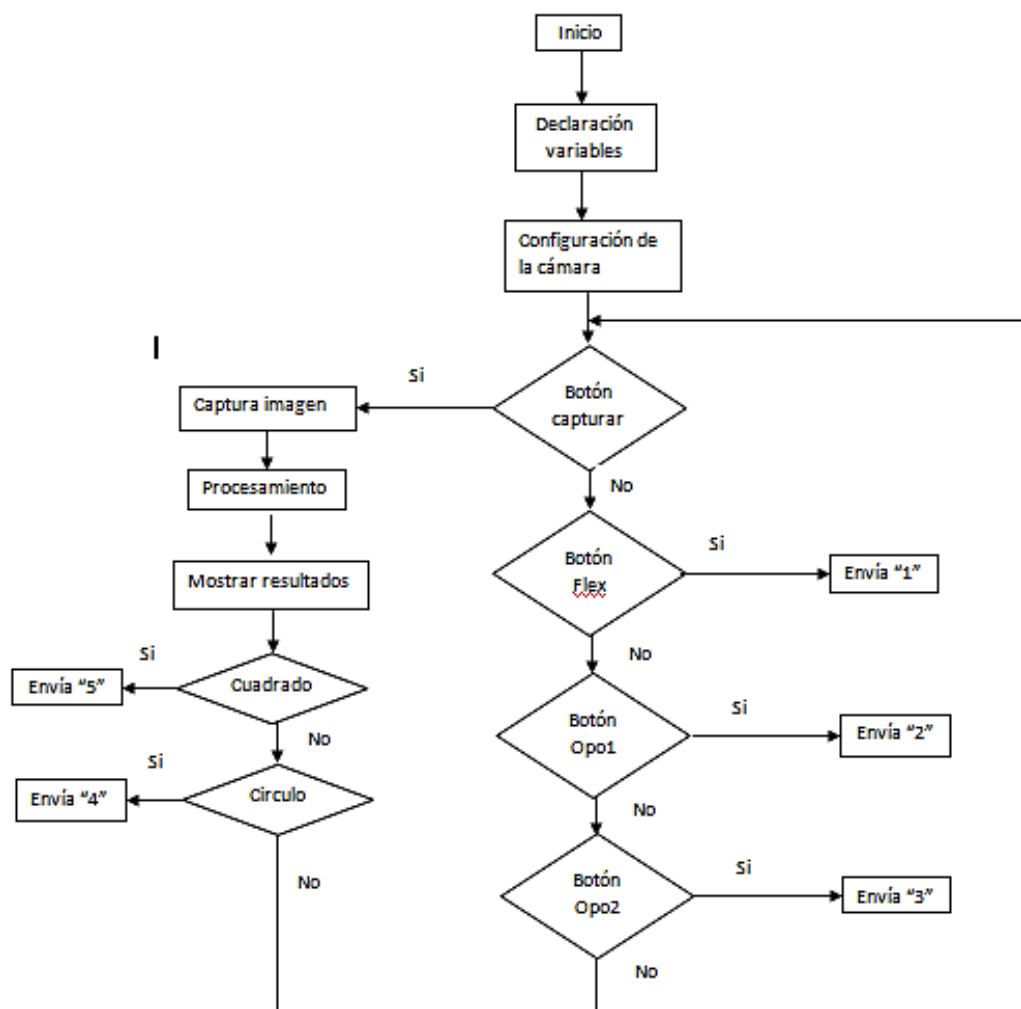
## Anexo 14. Diagrama de flujo programa coger pelota



## Anexo 15. Diagrama de flujo programa coger caja



## Anexo 16. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica en Guide de Matlab®



# Bibliografía

- [1] Madrigal, R. I., & Idiarte, E. V. (2002). Robots industriales manipuladores (Vol. 130). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [2] MONSALVE, J. G. R., TEMATICA, A., SANCHEZ, P. A. S., & ATEHORTUA, L. F. INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LA ROBOTICA.
- [3] Jandová, J. (2006). El robot huérfano. Panace, 7(24), 323.
- [4] El avance de la Robótica, Clasificación de los robots según su arquitectura. Disponible en: <https://sites.google.com/site/elavancedelarobotica/clasificacion-de-los-robots/clasificacion-de-los-robots-su>. Fecha de consulta 30/11/13.
- [5] Mauricio Galvez Legua. Robotica educativa. Disponible en: <http://www.perueduca.edu.pe/oei/pdf/robotica-educativa.pdf>. Fecha de consulta: 06/12/13.
- [6] Madrigal, R. I., & Idiarte, E. V. (2002). Robots industriales manipuladores (Vol. 130). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [7] Estrella Estrella, E. S., & Robayo Jácome, D. J. (2013). Diseño y construcción de un robot para la manipulación de explosivos (Doctoral dissertation, Ambato: Pontificia Universidad Católica del Ecuador).
- [8] Ninabanda, G., Danilio, F., & Nuñez Yáñez, M. P. (2010). Diseño y Construcción de un Microrobot Bailarin.
- [9] Ramos Velasco, M. A., & Flores Valencia, J. H. (2012). Construcción de prototipo de un brazo robótico controlado por un ordenador (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2012).
- [10] Villalpando, J. G. Z., Alberto, H. F. J., & Pablo, F. S. J. Implementación de un sistema de visión para control de un brazo robótico.
- [11] Constante Prócel, P. N. (2012). Diseño e implementación de un prototipo de brazo robótico para aplicaciones de clasificación y reconocimiento de formas en el proceso de paletizado empleando procesamiento digital de imágenes (Doctoral dissertation, LATACUNGA/ESPE/2012).
- [12] Madrigal, R. I., & Idiarte, E. V. (2002). Robots industriales manipuladores (Vol. 130). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [13] Madrigal, R. I., & Idiarte, E. V. (2002). Robots industriales manipuladores (Vol. 130). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [14] Rivas Bonilla, F. R. (2013). Clasificación de piezas con un robot Mitsubishi® RVM1 aplicando técnicas de visión artificial.
- [15] Bullón Vilchis, O. (2009). Automatización industrial (Doctoral dissertation).
- [16] Encalada Vivanco, M. E., & Trujillo Suquilanda, F. R. (2013). Diseño e implementación de un sistema de control para el robot AEC aplicación automática, utilizado en el transporte de piezas plásticas de la Empresa Ecuamatrix.

- [17] Ambrose, R. O., Aldridge, H., Askew, R. S., Burrage, R. R., Bluethmann, W., Diftler, M., ... & Rehnmark, F. (2000). Robonaut: NASA's space humanoid. *IEEE Intelligent Systems*, 15(4), 57-63.
- [18] Butterfaß, J., Grebenstein, M., Liu, H., & Hirzinger, G. (2001). DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 109-114). IEEE.
- [19] Rothling, F., Haschke, R., Steil, J. J., & Ritter, H. (2007, October). Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 2951-2956). IEEE.
- [20] ROBOTNIK (2001) Barrett hand. *Disponible en:* <http://robotnik.es/es/productos/manos-roboticas/barrett-hand>
- [21] Ueda, J., Ishida, Y., Kondo, M., & Ogasawara, T. (2005, April). Development of the NAIST-Hand with vision-based tactile fingertip sensor. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 2332-2337). IEEE.
- [22] LAJUD, H. C. & PÉREZ, J. G. H. (2006) "Diseño de un sistema articulado emulando el movimiento de una mano". Cuernavaca Morelos, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- [23] CUBADEBATE (2009) Científicos italianos logran que el cerebro controle mano biónica. *Disponible en:* <http://www.cubadebate.cu/noticias/2009/12/02/cientificos-italianos-logran-cerebro-controlar-mano-bionica/>
- [24] Prótesis para manos amputadas. *Disponible:* <http://www.discapacidadonline.com/protesis-mano-desarrollan-amputados-mexico.html>. Fecha de consulta 30/11/13
- [25] Jørgensen, J. A., & Petersen, H. G. (2008, September). Usage of simulations to plan stable grasping of unknown objects with a 3-fingered schunk hand. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Nice, France.
- [26] Suárez, R., & Grosch, P. (2003). Mano mecánica MA-I. XXIV Jornadas de Automática, CEA-IFAC, León, España, (ISBN 84-931846-7-5).
- [27] Guerrero Pérez, D. M., & Durán Gutiérrez, A. (2013). Construcción efector final Gripper para brazo antropomórfico RV-E2
- [28] Pari, L., Angel, L., Sánchez, F., Roberti, F., Sebastián, J. M., & Carelli, R. SEGUIMIENTO DE OBJETOS A ALTA VELOCIDAD MEDIANTE UN ROBOT PARALELO.
- [29] Andrade Zeas, D. M., & Zúñiga Tenesaca, D. A. (2011). Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas.



- [30] Gonzalez, J. D., Luna, R. F., Mendoza, A. J., & Zazueta, A. L. DISEÑO DE PROTOTIPO DE PRÓTESIS MECATRÓNICA DE MANO.
- [31] Robotha: Robótica humano–Asistencial <http://robotha.com/mioelectrica.htm>. Fecha de consulta 28/11/13
- [32] Bionics, T. (2012). “I-Limb Ultra. Disponible en: <http://www.touchbionics.com/prosthetiststherapists/benefiting-your-patients/>
- [33] Euronews (2013) El futuro al alcance de la mano [Vídeo]. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=Sd1Q0Biz5Ww>
- [34] ELUMOTION. ELU-2 Hand. Disponible: <http://www.elumotion.com/Elu2-hand.htm>. Fecha de consulta 28/11/13
- [35] ELUMOTION. Diseño de un Sistema Mecatrónico Antropomórfico de Cinco Dedos. Disponible en: <http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=201&sessionId=75&resId=0&materialId=paper&confId=47>. Fecha de consulta 28/11/13
- [36] Larrarte, E. A. Modelado y control de posición y de fuerza de una prótesis robótica de mano.
- [37] Maya Vargas, A. (2014). Sistema biométrico de reconocimiento de huella dactilar en control de acceso de entrada y salida.
- [38] Binvignat, O., Almagià, A., Lizana, P., & Olave, E. (2012). Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos. *International Journal of Morphology*, 30(2), 599-606.
- [39] Silva Castellanos, C. A., Muñoz Riaños, J. E., Garzón Alvarado, D. A., Landínez Parra, N. S., & Silva Caicedo, O. (2011). Diseño mecánico y cosmético de una prótesis parcial de mano. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 30(1), 15-41.
- [40] ROMERO, I. P., & AARÓN, M. (2011). *Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servo-articulada aplicable como prótesis* (Doctoral dissertation).
- [41] Armenta Valadez, A. (2015). Control de motores por medio de la plataforma AER-ROBOT.
- [42] Rivas Olivo, A. (2013). Máquinas Humanas: Entre conocer y hacer.
- [43] KOHAN, R., & CONTARDO, R. (1944). Aplasia cerebral-coloboma congénito del iris y de la Coroides. *Revista chilena de pediatría*, 15(7), 567-573.
- [44] SANCHÍS, L. G. M. 1 PRINCIPIOS BÁSICOS.
- [45] HUAMAN, L. D. B. Fotografía.
- [46] Shigley, J. E. (1970). *Análisis cinemático de mecanismos*. McGraw-Hill.
- [47] Navarro, N. P., Robles, S. C., & Paulsen, K. F. (2007). Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: modelado cinemático y dinámico. In *Octavo congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*.

- [48] Grimaldo, T. I. J., & Jiménez, D. E. R. DESARROLLO DE DISPOSITIVOS ORIENTADOS A MEJORAR EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE EN DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS II.
- [49] Sánchez, M. B. S. (2013). *Modelo de cálculo resistente de engranajes cilíndricos de alto grado de recubrimiento* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Educación a Distancia).
- [50] Bautista, C., Bermúdez, L., & Aristizábal, J. Prototipo de Medición Meteorológica para un Sistema de Alumbrado Público Solar.
- [51] Lloveras Llado, J. M., & Manzano Rubio, F. (2009). PROGRAMACIÓN DE UN ALGORITMO DE BAJO CONSUMO PARA MEDIR INTERVALOS DE TIEMPO MEDIANTE EL MSP430.
- [52] Montes, J. D., & González, J. D. (2009). Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano.
- [53] Asociación mexicana de mecatronica A.C. (s.f.). Cosas de Ingenieria. Obtenido de <http://cosasdeingenieria.com/esp/index/item/447/micro-motorreductor-de-metal-con-eje-de-motor-extendido-relacion-301>
- [54] Gonzales, V. R. (03 de 2002). Servomotores. Obtenido de [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/sistema/motores\\_servo.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/motores_servo.htm)
- [55] Tienda Robotica. (s.f). Tienda Robotica. Obtenido de [http://www.tiendarobotica.com/download/FLEXSENSOR\(REVA1\).pdf](http://www.tiendarobotica.com/download/FLEXSENSOR(REVA1).pdf)
- [56] Quintal, A. E. (08 de 07 de 2013). Sensores y actuadores. Obtenido de <http://sensoresyactuadorese7.blogspot.com/2013/07/sensores-de-fuerzaresistivos-fsr.html>
- [57] **Fuente:** Visión Artificial (introducción a la visión artificial). URL: [http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP\\_VisionArtificial/ApuntesVA/cap1IntroVA.pdf](http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP_VisionArtificial/ApuntesVA/cap1IntroVA.pdf)
- [58] Zambrano Rey, G. M., Parra Rodríguez, C. A., Manrique Torres, M. R., & Bustacara Medina, C. J. (2010). Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (CIM). *Ingeniería y Universidad*, 11(1).
- [59] Garnique, L. A. V., Cabrera, H. I. M., Chavarry, K. L. V., & Barco, M. J. V. (2014). VISIÓN ARTIFICIAL: APLICACIÓN DE FILTROS Y SEGMENTACIÓN EN IMÁGENES DE HOJAS DE CAFÉ. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 1(2).
- [60] Aranguren Zapata, A., & Vela Asin, T. (2012). *Sistema de seguimiento de objetos mediante procesamiento digital de imágenes aplicado al control de robots autónomos* (Doctoral dissertation, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas-UPC).
- [61] Espino Gudiño, M. (2014). *Procesamiento morfológico, espacios color y quaternions, con biometría de la imagen y otras aplicaciones* (Doctoral dissertation).
- [62] Enríquez, I. J. G., Bonilla, M. N. I., & Cortés, J. M. R. (2009). Segmentación de rostro por color de la piel aplicado a detección de somnolencia en el conductor. In *Congreso Nacional de Ingeniería Electrónica del Golfo CONAGOLFO* (pp. 67-72).
- [63] Villarrea, O., & Villamizar, R. (2014). Incrustación de imágenes en códigos de barras bidimensionales de rápida respuesta QR-codes. *Vínculos*, 10(2), 277-288.

- [64] MANRIQUEZ TORRES, J. E. S. U. S. (2009). *MICROSCOPIA OPTICA Y ANALISIS DE IMAGENES EN LA CARACTERIZACION DEL TIEMPO CARGADO DE DISCOS DE PULIDO* (Doctoral dissertation).
- [65] **Fuente:** dolthink (Tecnología e innovación). Visión artificial .Autor: Valeria Fernández URL: <http://www.dolthink.com/vision-artificial.html>
- [66] **Fuente:** visión artificial e interacción de mandos URL: <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/aplicaciones.html>
- [67] CASTANEDA DOMINGUEZ, A. B., & CORNELIO SERAFIN, J. D. J. (2012). *ANALISIS COMPARATIVO DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES MEDICAS ENTRE LAS TECNICAS CONVENCIONALES VS TECNICAS DIFUSAS* (Doctoral dissertation).
- [68] Villalta Moreno, W. M., & Fondevila Castro, J. J. (2012). Diseño e implementación de una herramienta demostrativa de aplicación de operadores morfológicos básicos con matlab.
- [69] Dorronsoro Beitia, E. (2010). Segmentación de imágenes mediante lógica difusa
- [70] GUERRERO ECHEVERRIA, A. L. E. X. (2010). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA HERRAMIENTA DIDACTICA DE SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL BASICO DE IMAGENES PARA LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION* (Doctoral dissertation).
- [71] Marin Patoni, A. (2014). Desarrollo de prototipo de aplicación (APP), para dispositivos móviles basados en el sistema operativo IOS, para el reconocimiento de objetos" hojas" en imágenes.
- [72] Pinilla, C., Alcalá, A., & Ariza, F. (1997). Filtrado de imágenes en el dominio de la frecuencia. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 8.
- [73] TRATAR, T. A. Estado del Arte de Proyecto de Titulación "Methodologies for automation on shape features extraction in the context of model design for product personality".
- [74] Pinilla, C., Alcalá, A., & Ariza, F. (1997). Filtrado de imágenes en el dominio de la frecuencia. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 8.
- [75] Aznar-Casanova, J. A., Casanova, J. A., & de la Vall d'Hebron, P. (2002). Análisis multiescala y multiorientación de imágenes mediante un banco de filtros de Gabor-2D. *Revista Cognitiva*, 12(2), 223-246.
- [76] Adrados Espada, D. (2012). Diseño de un sistema de control de dirección de un vehículo.

